

Michał LISOWSKI

INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI, ODDZIAŁ TECHNOLOGII I MATERIAŁOZNAWSTWA ELEKTROTECHNICZNEGO WE WROCŁAWIU

Metody wzorcowania cyfrowych mierników bardzo dużych rezystancji**Dr hab. inż. Michał LISOWSKI**

Profesor nadzwyczajny Politechniki Wrocławskiej. Ukończył w 1968 r. Wydział Elektryczny Politechniki Wrocławskiej. Stopień doktora n.t. 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.

e-mail: lisowski@iel.wroc.pl

Streszczenie

Scharakteryzowano znane metody wzorcowania mierników bardzo dużych rezystancji, działających na zasadzie pomiaru prądu przepływającego przez mierzony rezystor przy znanym napięciu źródła. Opisano własną metodę pośrednią, która umożliwia wzorcowanie tych mierników w zakresie pomiarowym wyższym niż rezystancja posiadanych rezystorów wzorcowych.

Abstract

The well-known methods of calibration of high resistance meters, acting on the basis of measurement of current flowing through measured resistor at well-known value of source voltage, were characterized. The author's own method indirect, which enable the calibration of these meters at measuring range higher than resistance with the possessed resistor standards, are described.

Słowa kluczowe: bardzo duże rezystancje, mierniki, wzorcowanie**Keywords:** high resistance meters, calibration**1. Wstęp**

Metody wzorcowania analogowych mierników bardzo dużych rezystancji autor opisał w pracy [1]. Problemom wzorcowania cyfrowych mierników bardzo dużych rezystancji poświęcony był referat na konferencji PPM'01 [2]. Niniejsza publikacja jest zmienioną i rozszerzoną wersją tamtego referatu.

Przyrządy pomiarowe, powinny spełniać określone wymagania metrologiczne. W Polsce wymagania te dla mierników bardzo dużych rezystancji określone są w Zarządzeniu Prezesa Głównego Urzędu Miar (GUM) z dn. 11.07.2000 r. [3]. Katalogi i instrukcje obsługi tych mierników powinny zawierać parametry metrologiczne obejmujące m.in.:

- zakresy pomiarowe,
- napięcia pomiarowe,
- dopuszczalne błędy graniczne,
- wpływy czynników zewnętrznych na prawidłowe działanie miernika,
- warunki użytkowania (temperatura, wilgotność, itp.).

Przyrządy pomiarowe wymagają wzorcowania w procesie produkcji, a potem okresowego wzorcowania w czasie ich eksploatacji. Dla mierników bardzo dużych rezystancji, nazywanych też miernikami oporu izolacji, tę kontrolę metrologiczną określa Instrukcja sprawdzania mierników oporu izolacji, stanowiąca załącznik do Zarządzenia nr 19 Prezesa GUM z dn. 11 lipca 2000 r. [4]. Zakres wzorcowania podany w tej instrukcji jest zbyt ubogi, a informacje o sposobie wzorcowania mogą okazać się niewystarczające dla personelu wykonującego te czynności. Pomiary bardzo dużych rezystancji należą do trudnych i wymagają dużego doświadczenia od personelu, a wzorcowanie mierników tych rezystancji jest jeszcze trudniejsze. Zawarte poniżej informacje wykraczają poza treść Instrukcji GUM [4], ale nie są z nią sprzeczne.

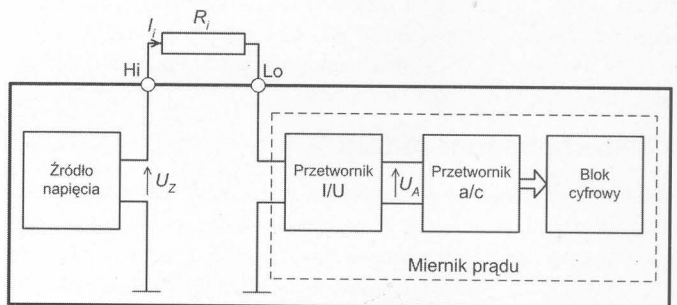
Działanie mierników bardzo dużych rezystancji najczęściej opiera się na pomiarze prądu przepływającego przez mierzoną rezystancję przy zadanym napięciu. Dlatego dla tych mierników bardzo ważna jest wartość napięcia pomiarowego. Podstawową więc czynnością przy kontroli metrologicznej tych przyrządów jest sprawdzanie wartości napięcia źródła pomiarowego miernika. Napięcie źródła powinno mieć wartość podaną w instrukcji obsługi przyrządu. Do jego kontroli należy użyć woltomierza o odpowiedniej dokładności i dostatecznie dużej rezystancji wejściowej ($\geq 100 \text{ M}\Omega$).

Instrukcja GUM [4] podaje, że błędy podstawowe mierników należy sprawdzić na wszystkich zakresach pomiarowych w ustalonych punktach kontrolnych, których liczba nie powinna być mniejsza od pięciu. Punkty te powinny być rozłożone równomiernie w obszarze każdego zakresu pomiarowego. Według instrukcji GUM [4] błędy podstawowe mierników rezystancji izolacji należy wyznaczyć przez porównanie wskazań mierników ze wskazaniami kalibratorów bardzo dużych rezystancji lub z wartościami rezystorów dekadowych. Dopuszcza ona też użycie pojedynczych rezystorów wzorcowych. Dla mierników bardzo dużych rezystancji takie bezpośrednie porównanie na najwyższych zakresach pomiarowych jest niemożliwe do zrealizowania, ponieważ brak jest odpowiednich rezystorów wzorcowych.

Zgodnie z normą PN-ISO/IEC 17025:2002 [5] wyniki wzorcowania, czyli wartości wyznaczonych błędów wskazań, powinny być podawane wraz z ich niepewnością. Instrukcja GUM [4] nie określa sposobu szacowania tych niepewności, a w przykładowych tabelach z wynikami pomiarów w rozdziale „dokumentowanie wyników sprawdzenia” brak jest niepewności wyznaczonych błędów.

2. Zasada funkcjonowania mierników cyfrowych bardzo dużych rezystancji

Omawiane w tej publikacji metody sprawdzania odnoszą się tylko do najczęściej stosowanych cyfrowych mierników bardzo dużych rezystancji, których funkcjonowanie opiera się na pomiarze prądu przepływającego przez mierzoną rezystancję (rys. 1). Takie mierniki produkowane są m.in. przez firmy Keithley, Quad Tech, Agilent (Hewlett Packard).



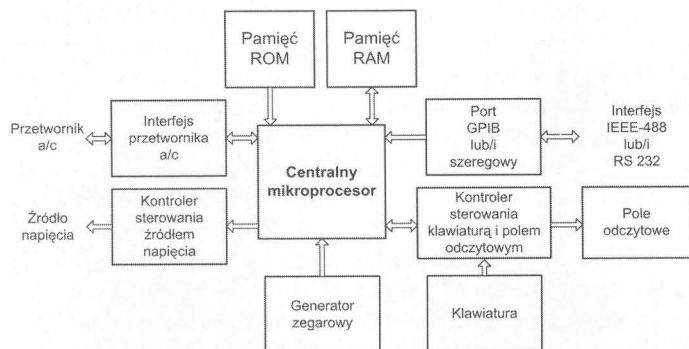
Rys. 1. Schemat ideowy cyfrowego miernika dużych rezystancji

Prąd I_i , przepływający przez mierzoną rezystancję R_i , przetwarzany jest w przetworniku I/U na napięcie, które następnie przetwarzane jest na postać cyfrową w przetworniku analogowo-cyfrowym a/c. Źródłem tego prądu jest stabilizowane źródło kalibrowanego 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 kalibrowanego źródła, I_i - prąd przepływający przez mierzoną rezystancję R_i .

Zmianę zakresu prądu dokonuje się za pomocą rezystancji w sprzężeniu zwrotnym wzmacniacza, pracującego jako przetwornik I/U. Przy ustalonej wartości napięcia źródła, jest to równoznaczne ze zmianą zakresu miernika dużych rezystancji. Zakres pomiarowy miernika rezystancji zależy również od wartości napięcia źródła. Napięcie wyjściowe U_A z przetwornika I/U przetwarza się następnie na postać cyfrową w przetworniku analogowo-cyfrowym a/c. Sygnał wyjściowy tego przetwornika o postaci cyfrowej przesyłany jest do bloku cyfrowego, którego schemat blokowy przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Schemat bloku cyfrowego

Zasadniczą częścią bloku cyfrowego jest specjalistyczny mikrokomputer. Składa się on z centralnego mikroprocesora, generatora zegarowego, pamięci RAM i ROM, interfejsu przetwornika a/c, kontrolera sterowania źródłem napięcia, kontrolera sterowania klawiatury i pola odczytowego, portu interfejsu równoległego lub/i szeregowego. Mikrokomputerowa struktura przyrządu umożliwia jego wielofunkcyjną pracę, samoczynne obliczenia, kompensację offsetu, sterowanie z płyty czołowej lub zewnętrznego komputera podłączonego poprzez interfejs, zapamiętywanie i przesyłanie danych do zewnętrznego komputera.

Cyfrowe mierniki bardzo dużych rezystancji charakteryzują się zazwyczaj lepszymi parametrami metrologicznymi niż analogiczne mierniki analogowe. Najbardziej znane są mierniki wysokich rezystancji (elektrometry) firmy Keithley. Na szczególną uwagę zasługuje model 6517A [6]. Umożliwia on pomiary napięcia, bardzo małych prądów, ładunku elektrycznego oraz wysokich rezystancji do $10^{18} \Omega$. Elektrometr ten wyposażony jest w wewnętrzne źródło programowanego napięcia do 1000 V o dodatniej i ujemnej polaryzacji. Niedokładność tego napięcia wynosi $\pm 0,15\%$, a zmiana zera (offset): $\pm(10 \div 100)$ mV. W zakresie do 2 T Ω niedokładność pomiaru rezystancji wynosi $\pm 0,35\%$, a w zakresie do 200 T Ω - $\pm 1,15\%$. Powyżej 200 T Ω niedokładność oblicza się z niedokładności źródła napięcia i pomiaru prądu.

3. Metoda bezpośrednia

Metoda bezpośrednia wzorcowania mierników rezystancji polega na włączeniu w miejsce rezystora mierzonego R_x nastawnego (dekadowego) rezystora wzorcowego R_n . Zaleca się, aby niepewność wartości rezystora nie przekraczała jednej dziesiątej dopuszczalnego błędu wzorcowanego miernika. Dopuszcza się użycie rezystora wzorcowego o niepewności wartości nastawy 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.

Wzorcowanie mierników rezystancji metodą bezpośredniego porównania jest możliwe w zakresie nastaw kontrolnego rezystora wzorcowego. Wielo-dekadowe rezystory drutowe, charakteryzujące się znacznie większą dokładnością od innych rezystorów (kompozytowych i tlenkowych), mają przeważnie najwyższe dekady o wartości 10×10 M Ω , a niekiedy 10×100 M Ω . Najdokładniejsze rezystory dekadowe o wartości rezystancji powyżej 100 M Ω na jeden stopień dekady produkowane są przez amerykańską firmę IET

LABS Inc. [7]. Firma ta oferuje rezystory dekadowe o rezystancji najwyższej dekady 100 G Ω na stopień, o niedokładności $\pm 0,5\%$ lub $\pm 1\%$. Dla rezystorów tej dekady dopuszczalne zmiany rezystancji wynoszą: w funkcji temperatury $\pm 0,05\%/^{\circ}\text{C}$, w funkcji napięcia ± 5 ppm/V, w funkcji czasu $\pm 0,05\%/rok$. Takie rezystory dekadowe mogą być stosowane do kontroli metrologicznej mierników bardzo dużych rezystancji w zakresie do 1 T Ω .

W Polsce prowadzone były prace badawcze nad zbudowaniem rezystorów dekadowych do 10 G Ω na stopień, o niedokładność $\pm(0,5 \div 1)\%$ [8]. Również firma ZELAP oferuje wysokoomowe rezystory dekadowe o najwyższej dekadzie $10 \times 100 \text{ G}\Omega$ klasy 2,5. Dekady $10 \times (100 \text{ M}\Omega \div 10 \text{ G}\Omega)$ mają klasę 1,5, a $10 \times 10 \text{ M}\Omega$ i $10 \times 1 \text{ M}\Omega$ - klasę 1. Zbudowane są one w oparciu o rezystory Thick Film F44D firmy Welwyn, Metal Oxide ROX-1 firmy Vishay-Dale i GS-1 firmy Tama [9].

Rezystory dekadowe powyżej 100 M Ω na stopień są nowością i najczęściej nie są dostępne w laboratoriach pomiarowych. Dlatego to miernik rezystancji w granicach do 1 G Ω można w praktyce wzorcować metodą bezpośrednią, przez podstawienie rezystora wzorcowego w miejsca rezystora mierzonego.

W zakresie od 1 G Ω do 100 T Ω produkowane są wzorcowe rezystory o pojedynczych wartościach nominalnych: 1 G Ω , 10 G Ω , 100 G Ω , 1 T Ω , 10 T Ω , 100 T Ω . Takie rezystory o najwyższych dokładnościach, produkowane przez firmę Measurement International (model 9331S) [10], do 1 T Ω mają tolerancję wartości $\pm 1\%$, a powyżej 1 T Ω - $\pm 5\%$. W danych katalogowych dla 1 G Ω podano niepewność wzorcowania ± 30 ppm, dla 10 G Ω - ± 700 ppm, dla 100 G Ω - $\pm 0,1\%$, dla 1 T Ω - $\pm 0,2\%$, dla 10 T Ω - $\pm 0,3\%$, oraz dla 100 T Ω - $\pm 1\%$.

Firma Guildline Instruments oferuje wzorce najwyższych rezystancji o jeszcze lepszych parametrach [11]. Należy zwrócić uwagę, że rezystory o wartościach większych od 1 T Ω są tylko imitatorami rezystancji składającymi się z rezystorów o mniejszych wartościach połączonych w gwiazdę. Jeżeli tę gwiazdę zamieni się w równoważny trójkąt rezystancji, to uzyskuje się teoretycznie bardzo duże rezystancje. Rezystory te mogą z powodzeniem być wykorzystywane do wzorcowania mierników wysokich rezystancji mierzących w układzie przedstawionym na rysunku 1. W innych układach, np. mostkowych, mogą powodować uzyskiwanie błędnych wyników.

Wzorcowe rezystory wysokoomowe umożliwiają sprawdzanie mierników bardzo dużych rezystancji tylko w pojedynczych punktach zakresów pomiarowych.

Firma Keithley w instrukcji „Service Manual” elektrometru 6517 podaje procedurę sprawdzania i kalibracji¹⁾ zakresów rezystancyjnych metodą bezpośrednią [12]. W zakresie 2 M $\Omega \div 200$ M Ω zaleca ona stosowanie kalibratora rezystancji firmy Fluke, model 5700A; natomiast w zakresie 2 G $\Omega \div 200$ G Ω - zestawu kalibracyjnego Keithley 5156, zawierającego cztery wartości rezystancji: 100 M Ω , 1 G Ω , 10 G Ω i 100 G Ω ; a w zakresie 1 T $\Omega \div 200$ T Ω - rezystorów wzorcowych 1 T Ω , 10 T Ω i 100 T Ω (brak informacji o wymaganych parametrach). Zatem firmowa procedura wzorcowania elektrometru 6517 umożliwia pełne wzorcowanie jedynie w zakresie do 100 M Ω . Powyżej tej wartości sprawdzanie i kalibracja odbywa się tylko w pojedynczych punktach dla każdego zakresu pomiarowego i to tylko w zakresie do $10^{14} \Omega$, a elektrometr może mierzyć rezystancje nawet do $10^{18} \Omega$.

Wyłania się więc problem - jak spełnić wymaganie sprawdzenia błędów wskazań miernika bardzo dużych rezystancji w co najmniej pięciu punktach każdego zakresu pomiarowego? Jest to możliwe tylko metodą pośrednią.

1) W dokumentacji firmy Keithley „Model 6517 Elektrometr - Service Manual” używa się pojęć „verification” i „calibration”. Czynność „verification” polega na sprawdzeniu, czy błędy wskazań mieszczą się w dopuszczalnych granicach, a czynność „calibration” polega na doprowadzeniu poprzez przeprogramowanie do wskazań mieszczących się w granicach błędów dopuszczalnych.

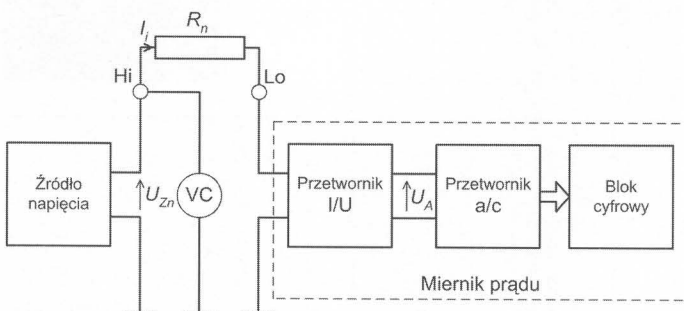
4. Metoda pośrednia

Elektrometryczne mierniki bardzo dużych rezystancji, według zasady ich działania, mierzą prąd przepływający przez mierzony rezystor przy określonym napięciu. Poprawność wskazań tych mierników można więc wyznaczyć pośrednio: wyznaczając błędy przyrządu jako miernika prądu oraz wyznaczając błędy źródła napięcia. Ponieważ wskazania miernika rezystancji określone są wzorem (1), to względny błąd jego wskazań można obliczyć z zależności:

$$\delta R_i = \delta U_z - \delta I_i \quad (2)$$

w której: δU_z - względny błąd napięcia źródła U_z ,
 δI_i - względny błąd pomiaru prądu I_i .

Jeżeli miernik jest używany przy wybranych wartościach napięcia, np. 100 V, 500 V i 1000 V, to należy dla tych napięć wyznaczyć też wartości błędów. Następnie należy wyznaczyć wartości błędów dla pomiarów prądu na zakresach odpowiadających pomiarom badanych rezystancji. Można to zrobić w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 1. Przy czym w miejsce rezystora mierzonego R_i należy włączyć rezystor wzorcowy R_n , a do źródła napięcia - jeżeli nie jest ono kalibratorem - należy dołączyć woltmierz cyfrowy o odpowiedniej dokładności. Obrazuje to rysunek 3.



Rys. 3. Układ pomiarowy do wzorcowania miernika dużych rezystancji na zakresach prądowych

W tej metodzie pomiary będą wykonywane przy stosunkowo niskich napięciach. Należy więc szczególną uwagę zwrócić na zachowanie się rezystorów wzorcowych w funkcji napięcia. Bardzo często rezystory te wzorcuje się przy 100 V i dla napięć mniejszych lub większych, wartości ich rezystancji mogą być inne, gdyż ze wzrostem wartości rezystorów wysokoomowych wzrastają wartości ich napięciowych współczynników rezystancji (NWR). Na przykład, rezystory wzorcowe firmy Measurements International typu 93331S o wartości nominalnej 10 T Ω mają współczynnik $NWR=5$ ppm/V, a o wartości 100 T Ω - już $NWR=200$ ppm/V [10].

Podobnie należy też zwrócić uwagę na wpływ temperatury otoczenia na zmianę wyników pomiarów. Rezystory wzorcowe o najwyższych wartościach mają stosunkowo duże temperaturowe współczynniki rezystancji (TWR). Na przykład, dla rezystorów dekadowych HRRS firmy IET LABS, Inc. dla dekady 10x100 k Ω jej współczynnik $TWR=5$ ppm/ $^{\circ}$ C, a dla dekady 10x100 G Ω - $TWR=500$ ppm/ $^{\circ}$ C [7].

Trzeba także zwracać uwagę na niestabilność czasową rezystorów wysokoomowych. Wspomniane już rezystory 9331S o wartości nominalnej 10 T Ω mają roczną niestabilność ± 500 ppm, a o wartości 100 T Ω - już ± 2 % [10].

Ponadto należy pamiętać, że dla rezystorów o najwyższych wartościach czas ustalania się wskazań wartości jest bardzo długi i może wynosić nawet kilkadziesiąt minut [1].

5. Podsumowanie

Wzorcowanie cyfrowych mierników bardzo dużych rezystancji wykonuje się najczęściej metodą bezpośredniego podstawienia dekadowego rezystora wzorcowego w miejsce rezystora mierzonego.

Zakres rezystancji takich rezystorów dekadowych ograniczony jest najczęściej do 1 G Ω . Powyżej, w zakresie do 100 T Ω , produkowane są tylko rezystory o stałych wartościach. Ze wzrostem wartości rezystorów wzorcowych wzrasta ich niedokładność. Dla najlepszych rezystorów 100 T Ω niepewność określenia ich rezystancji wynosi kilka procent. Natomiast cyfrowe mierniki bardzo dużych rezystancji mają zakresy pomiarowe do 10¹⁸ Ω . Wzorcowanie tych mierników w górnych zakresach pomiarowych możliwe jest metodą pośrednią. Metoda ta polega na oddzielnym wzorcowaniu źródła napięcia i miernika prądu, stanowiących integralną całość takiego miernika bardzo dużych rezystancji.

Wzorcowanie mierników bardzo dużych rezystancji nie jest łatwe. Wymaga znajomości zasady działania miernika i jego konstrukcji, posiadania odpowiednich wysokoomowych rezystorów wzorcowych o wartościach znanych i odniesionych do międzynarodowych wzorców SI. Personel powinien mieć odpowiednią wiedzę i doświadczenie z dziedziny pomiarów elektrometrycznych, ażeby mógł ocenić wpływy różnych zjawisk na wyniki wzorcowania i umiał wyeliminować czynniki fałszujące pomiary. Należy pamiętać, że wyznaczone błędy wskazań wzorcowanego miernika powinny być podane wraz z ich niepewnością, gdyż tylko wtedy można dokonać oceny czy wskazania przyrządu mieszczą się w dopuszczalnych granicach.

Opisane metody wzorcowania mierników bardzo dużych rezystancji zostały wielokrotnie przetestowane w Pracowni Pomiarów i Diagnostyki Oddziału Wrocławskiego Instytutu Elektrotechniki.

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

6. Literatura

- [1] Lisowski M.: Metody sprawdzania poprawności wskazań analogowych mierników bardzo dużych rezystancji. PAK 2003, nr 6, s. 10-14.
- [2] Lisowski M.: Problemy wzorcowania cyfrowych mierników bardzo dużych rezystancji. Materiały konferencji naukowo-technicznej PPM'01. Prace Komisji Metrologii Oddział w Katowicach. Seria: Konferencje Nr 4. Gliwice - Ustroń 2001, s. 365-372.
- [3] Zarządzenie nr 18 Prezesa Głównego Urzędu Miar z dn. 11.07.2000 r. w sprawie wprowadzenia przepisów metrologicznych o miernikach oporu izolacji. Dz. Urz. Miar i Probiernictwa 2000, nr 4, s.149.
- [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-ISO/IEC FDIS 17025:2001 Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących.
- [6] Model 6517A Electrometer / High - Resistance Meter. Katalog firmy Keithley.
- [7] High Resistance Decade Substituter HRRS Series. IET LABS, Inc. www.ietlabs.com .
- [8] Kłos Z.: Wysokoomowe dekadowe wzorce do testowania mierników wielkich rezystancji metodą bezpośrednią. Metrologia i Probiernictwo 1997, nr 2, s. 12.
- [9] ZELAP Zakład Elektronicznej Aparatury Pomiarowej Jerzy Jaskulski: Oporniki dekadowe wysokoomowe typu OD-1-W i OD-2-W. Karta katalogowa. www.zelap.com.pl .
- [10] Model 9331S Standard AIR Resistor. Measurements International. www.mintl.com .
- [11] GUILDLINE INSTRUMENTS Ltd.: High value resistance standards 9336 series, and ultra high value resistance standards 9337 series. www.guildline.com .
- [12] Model 6517A Electrometer. Servus Manual. Keithley Instruments, Inc., 1995.

Title: Problems of calibration of digital high resistance meters.