

Problemy w pomiarach wysokich rezystancji

Edyta Dudek, Michał Mosiądz, Marcin Orzepowski, Lidia Snopek

Główny Urząd Miar, Zakład Elektryczny, Laboratorium Wzorców Wielkości Elektrycznych

W Głównym Urzędzie Miar (GUM) rozwijana jest dziedzina pomiarów wysokich rezystancji. Wyposażenie pomiarowe umożliwia wzorcowanie rezystorów do 1 PΩ. Specyfika takich pomiarów wymaga stosowania specjalnych rozwiązań w projektowaniu układów pomiarowych, znajomości budowy i właściwości rezystorów wysokoomowych. Bardzo ważne jest zastosowanie specjalnej metody ekranowania przewodów pomiarowych i rezystorów. W referacie opisano metody pomiarowe stosowane w GUM, konstrukcję wzorców oraz niektóre problemy występujące podczas takich wzorcowań.

Problems in the high-resistance measurements

In the Central Office of Measures (GUM) high resistance measurements and calibrations are being developed. Measurement equipment in the GUM gives the possibility of resistor calibrations of up to 1 PΩ. Such measurements require the use of specific measurement circuits, familiarity with design and properties of high-ohmic resistors, as well as the specialized knowledge. In this article, construction of the high-resistance comparator with binary voltage divider is described. During high-resistance measurements, we solved a lot of problems specific for this branch of metrology. To achieve the best accuracy in calibrations, the use of correction factors is necessary to account for variability of voltage and temperature. One of the most important challenges is the necessity of decreasing the leakage current to minimize the contribution of this effect to the uncertainty budget.

1. Wstęp

W Laboratorium Wzorców Wielkości Elektrycznych GUM pomiary wysokich rezystancji są wykonywane podczas transferu jednostki miary rezystancji na wzorce odniesienia z zakresu od 1 MΩ do 1 PΩ. Możliwe jest przekazanie jednostki od grupowego wzorca jednostki miary rezystancji (6 wzorców o wartości nominalnej 1 Ω), lub wzorca pierwotnego [1, 2]. Zastosowanie układów pomiarowych zależy od wartości i niepewności.

Jednostka rezystancji z wzorca pierwotnego przekazywana jest komparatorem kriogenicznym (CCC) na stabilny wzorzec wtórny o wartości nominalnej 100 Ω. Następnie przy pomocy CCC jednostka przenoszona jest na wzorce 1 Ω, 10 Ω, 100 Ω, 1 kΩ i 10 kΩ. Przeniesienie jednostki na rezystory > 10 kΩ odbywa się komparatorem 6000B firmy Measurement International (MiL). Umożliwia on transfer jednostki na rezystory 10 kΩ ÷ 1 GΩ z niepewnością 0,1 ppm ÷ 5 ppm, a w specjalnej konfiguracji od 10 GΩ do 1 TΩ z niepewnością 20 ppm ÷ 500 ppm. Do wzorcowania rezystorów 10 GΩ ÷ 1 PΩ z niepewnością 0,025 % ÷ 1 % stosowany jest teraomierz.

2. Układy pomiarowe

Komparator 6000B jest to układ mostkowy zbudowany w oparciu o binarny dzielnik napięcia (Binary Voltage Divider – BVD). Rysunek 1 przedstawia schemat komparatora wysokich rezystancji. Rezystory R_x oraz R_s tworzą jedną gałąź mostka prądu stałego, natomiast drugą – BVD. Istotne jest by wartość nominalna rezystora R_x była nie mniejsza niż wartość nominalna R_s . Zwykle stosuje się rezystory o stosunku wartości 1 : 10 ze względu na optyma-

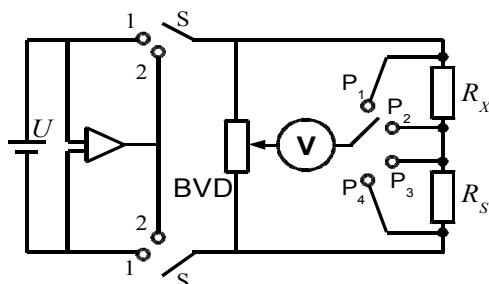
lizację niepewności układu. Możliwy jest również pomiar rezystorów o stosunkach 1:100 i 1:1000.

Istotą pomiaru jest wymuszenie przy pomocy stabilnego źródła napięcia stałego U o zakresie 1 ÷ 100 V przepływu prądu I poprzez oporniki R_X oraz R_S i pomiar stosunku spadków napięć na rezystorach.

$$r = \frac{R_X}{R_S} = \frac{U_{12}}{I} \cdot \frac{I}{U_{34}} = \frac{V_1 - V_2}{V_3 - V_4} \quad (1)$$

Stosunek rezystancji zależy od spadków napięć U_{12} i U_{34} na opornikach R_X oraz R_S . Napięcie U_{12} to różnica potencjałów $V_1 - V_2$, zaś U_{34} to różnica potencjałów $V_3 - V_4$. BVD pozwala wyznaczyć stosunki r_1, r_2, r_3, r_4 potencjałów V_1, V_2, V_3, V_4 , w punktach P_1, P_2, P_3, P_4 , do potencjału U dodatniej elektrody źródła napięcia. Wzór (2) pokazuje zależność stosunku rezystancji od wyznaczonych stosunków potencjałów.

$$r = \frac{\frac{V_1 - V_2}{U} - U}{\frac{V_3 - V_4}{U} - U} = \frac{r_1 - r_2}{r_3 - r_4} \quad (2)$$



Rys. 1. Schemat systemu do pomiaru wysokich rezystancji z BVD

W komparatorze 6000B w przypadku pomiarów i autokalibracji układu przełącznikami steruje mikrokontroler. W związku z możliwością częstej autokalibracji dzielnika, a także z tym, iż pomiar stosunku dwóch rezystorów wysokoomowych zależy od wyznaczenia stosunku napięć, a nie od ich wartości rzeczywistych, możliwe jest wzorcowanie osiągające niepewność względną rzędu 10^{-7} .

3. Wzorce odniesienia

Wzorce odniesienia wysokich rezystancji w laboratorium to rezystory produkcji ZSRR oraz MiL. Są to rezystory drutowe wykonane ze stopów typu manganin. Konstrukcja zabezpiecza je przed zmianami temperatury oraz zapewnia małe wartości współczynników korekcyjnych.

Stosowane w GUM wzorce wysokich rezystancji typu: „P4013”, „P4023”, „P4033”, „P4085” są rezystorami odniesienia dzięki powiązaniu wartości rezystora 1 MΩ z państwowym wzorcem jednostki miary rezystancji.

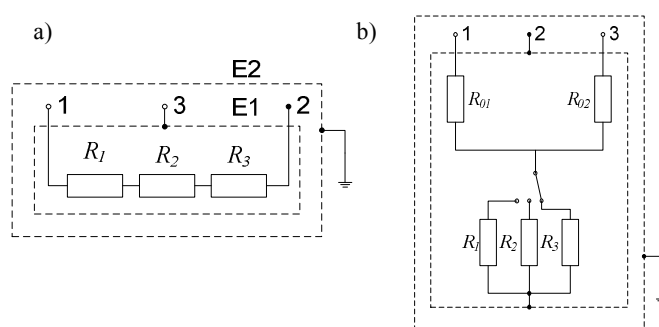
Konstrukcję rezystorów (rys. 2a) o wartościach nominalnych 1 MΩ ÷ 100 MΩ oparto o układ trzech elementów rezystancyjnych – główny rezystor (R_1) wykonany z drutu rezy-

stancyjnego o niewielkim przekroju w izolacji szklanej, podobny rezystor dopasowujący (R_2) oraz regulacyjny (R_3). Układ umieszczono w podwójnym ekranie – ekran wewnętrzny (E1) zapobiega upływowi ładunku, oraz ekran zewnętrzny (E2), zabezpiecza przed zakłóceniami zewnętrznymi.

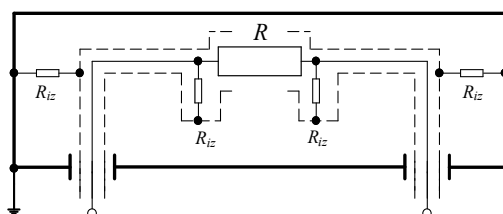
Konstrukcję rezystorów „P4085” (rys. 2b) wymusza trudność wykonania rezystorów wysokiej dokładności o wartości $> 1 \text{ G}\Omega$. Przekształcając one napięcie wejściowe na prąd. Rezystory R_{01} i R_{02} o wartościach ok. $500 \text{ M}\Omega$ są głównymi rezystorami układu. Z rezystorami $R_1 \approx 25 \text{ M}\Omega$, $R_2 \approx 2,5 \text{ M}\Omega$, $R_3 \approx 250 \text{ k}\Omega$ w układzie gwiazdy („T”) tworzą imitator rezystancji $10 \text{ G}\Omega$, $100 \text{ G}\Omega$, $1 \text{ T}\Omega$ [4]. Wartości rezystorów R_1 , R_2 , R_3 zapewniają rezystancję układu bliską nominalnej. Po transfiguracji układu „T” w trójkąt („II”) rezystancja R_{12} między zaciskami 1 i 2 wynosi

$$R_{12} = R_{01} + R_{02} + \frac{R_{01} \cdot R_{02}}{R_x} = R_{01} + R_{02} \cdot \left(1 + \frac{R_{01}}{R_x} \right) \quad (3)$$

gdzie R_x oznacza rezystor R_1 , R_2 lub R_3 .



Rys. 2. Konstrukcja rezystorów typu a) „P4013;23;33”, b) „P4085”



Rys. 3. Konstrukcja wewnętrzna rezystorów typu 9331G

Wzorcami odniesienia są też rezystory MiL typu 9331G, posiadające pojedynczy ekran i rezystancję $< 100 \text{ M}\Omega$, o stabilności czasowej $(5 \div 25) \text{ ppm/rok}$ dla wartości $1 \text{ M}\Omega \div 100 \text{ M}\Omega$. Rozszerzeniem ich zakresu są rezystory 9331G ($100 \text{ M}\Omega \div 100 \text{ T}\Omega$). Ich budowę pokazuje rys. 3. Są one hermetycznie zamknięte, z opcją wbudowanego czujnika temperatury i osobnymi ekranami obu stron rezystora.

4. Problemy pomiarowe

Pomiary wysokich rezystancji wykonywane są przy niskich prądach pomiarowych – pomiar rezystora $1 \text{ G}\Omega$ przy napięciu 1 kV wymaga prądu $1 \mu\text{A}$, a przy napięciu 100 V –

– 0,1 μA . Przy pomiarze należy eliminować wszelkie możliwe zakłócenia oraz właściwie ekranować wzorce i przewody.

Głównym problemem przy pomiarze rezystorów wysokoomowych jest eliminacja upływności izolacji. Często stosowana jest mało podatna na procesy starzeniowe izolacja szklana lub polimerowa w szczelnie zamkniętej obudowie. Istotna jest jakość przewodów. Narażenia mechaniczne powodują ich szybką degradację.

Metodą minimalizacji upływności izolacji jest połączenie ekranu przewodu „high” i wewnętrznego ekranu do potencjału pomiarowego [5]. Prąd upływności to

$$I_{iz} = \frac{V_A - V_B}{R_{iz}} \quad (4)$$

gdzie V_A , V_B – potencjał żyły przewodzącej i ekranu, R_{iz} – rezystancja izolacji. Prąd upływu $I_{iz} \rightarrow 0$ przy $(V_A - V_B) \rightarrow 0$, co pozwala zapobiec upływowi ładunku przez izolację zdegradowaną przez efekty starzenia i uszkodzenia mechaniczne.

Podłączenie ekranu do wysokiego potencjału pomiarowego zmniejsza błąd o kilka rzędów wielkości.

5. Podsumowanie

Wzorcowanie rezystorów wysokich rezystancji wymaga zmierzenia się z problemami specyficznymi dla pomiarów bardzo niskich prądów. Kluczowym zagadnieniem staje się minimalizacja wpływu upływności izolacji. Dzięki specjalnemu sposobowi ekranowania przewodów oraz rezystorów, a także dzięki specjalnym rozwiązaniom konstrukcyjnym przyrządów pomiarowych, możliwe jest zmniejszenie udziału tego zjawiska w niepewności wyników.

Literatura

- [1] D. Domańska-Myśliwiec, M. Mosiądz, L. Snopek: *Od kwantowego efektu Halla do rezystora wzorcowego – system przekazywania jednostki miary*. PAK nr 9 (2007), s. 78-81.
- [2] R. E. Elmquist, N. M. Zimmerman, W. H. Huber: *Using a high-value resistor in triangle comparisons of electrical standards*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 52 (2003), s. 590-593.
- [3] T. B. Roždestvenskaja, W. L. Žutovskij: *Miery bol'sogo soprotivlenija*. Izmieritel'naja Tehnika nr 3 (1968).
- [4] P. Madej: *Analiza niepewności pasywnego wzorca imitującego bardzo duże rezystancje*. PAR nr 10 (2006), s. 72-77.
- [5] M. Lisowski: *Pomiary rezystywności i przenikalności elektrycznej dielektryków stałych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.