

Michał LISOWSKI¹, Krystian KRAWCZYK¹, Edyta DUDEK², Michał MOSIĄDZ²

¹ POLITECHNIKA WROCLAWSKA, INSTYTUT PODSTAW ELEKTROTECHNIKI I ELEKTROTECHNOLOGII, pl. Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław

² GŁÓWNY URZĄD MIAR, ZAKŁAD ELEKTRYCZNY, LABORATORIUM WZORCÓW WIELKOŚCI ELEKTRYCZNYCH, ul. Elekoralna 2, 00-139 Warszawa

System przekazywania jednostki rezystancji od wzorca pierwotnego QHR do wzorców 100 TΩ oparty na transferach Hamona

Prof. dr inż. Michał LISOWSKI

Stopień doktora n.t. uzyskał w 1975, a doktora honoris causa w 1990, tytuł profesora w 2007. Do 1994 pracował w Instytucie Metrologii Elektrycznej, a od 1995 w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektroenergii PWr, gdzie obecnie jest kierownikiem Zakładu Elektrotechnologii. W pracach naukowych zajmuje się metrologią elektryczną, problemami wzorcowania przyrządów pomiarowych, systemami pomiarowymi do badania nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego i badaniami materiałów elektrotechnicznych.

e-mail: michal.lisowski@pwr.wroc.pl



Mgr Edyta DUDEK

Ukończyła z wyróżnieniem Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. W pracy magisterskiej, w dziedzinie mechaniki kwantowej zajmowała się badaniem modeli barionu. Od 1997 roku pracuje w Głównym Urzędzie Miar, zajmuje się państwowym wzorcem napięcia elektrycznego, opartym na kwantowym efekcie Josephsona, a także problematyką pomiarów elektrycznych najwyższej dokładności, budową systemów pomiarowych, doskonaleniem metod wzorcowania.

e-mail: dc.standards@gum.gov.pl



Mgr inż. Krzysztof KRAWCZYK

W 2006 r. ukończył studia na kierunku Inżynieria Materiałowa na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej. W tym samym roku rozpoczął studia doktoranckie na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej. Obecnie jest na IV roku tych studiów i kończy redagowanie pracy doktorskiej. W swoich pracach naukowych zajmuje się zagadnieniami związanymi z wzorcowaniem rezystorów wzorcowych i przekazywaniem jednostki rezystancji.

e-mail: krystian.krawczyk@pwr.wroc.pl



Dr inż. Michał MOSIĄDZ

W 2000 r. ukończył Wydział Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej specjalizując się w zakresie inżynierii materiałów i systemów monitorujących. W 2005 r. obronił rozprawę doktorską na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej w dziedzinie pomiarów właściwości magnetycznych materiałów nadprzewodzących. Od 2006 roku pracuje w Głównym Urzędzie Miar. Jest opiekunem państwowego wzorca oporu elektrycznego.

e-mail: electricity@gum.gov.pl



Streszczenie

Przedstawiono ideę systemu przekazywania jednostki rezystancji od wzorca pierwotnego QHR (Quantum Hall Resistance) do wzorców o dużych wartościach rezystancji, aż do 100 TΩ. W zakresie do 100 kΩ system ten bazuje na komparatorze kriogenicznym, a od 100 kΩ na transferach Hamona. Transfery te umożliwiają bardzo dokładne porównanie wartości rezystancji wzorców w stosunku 1:10 i 1:100. Opisano specjalnie wykonane dla tego systemu prototypowe transfery Hamona i ich zastosowanie w systemie.

Słowa kluczowe: spójność pomiarowa, wzorce rezystancji, transfery Hamona, duże rezystancje, wysoka dokładność.

System of resistance unit transfer from the QHR primary standard to 100 TΩ standards based on Hamon transfer

Abstract

An idea of a system for resistance unit transfer from QHR (Quantum Hall Resistance) to high value resistance standards up to 100 TΩ is presented in the paper. Below 100 kΩ this system is based on a cryogenic current comparator, and above 100 kΩ on Hamon transfers. Hamon transfers allow very accurate comparison of standards resistance values in ratios 1:10 and 1:100. Prototypes of Hamon transfers specially made for this system are described. The factors influencing accuracy of the Hamon transfers are presented. The most important of them are: insulation leakage, temperature variation of resistor surroundings, voltage variation, humidity of surrounding air, charge building in the insulation and highest value resistors. The methods for minimisation of influence of those factors are described. The construction solutions to minimise the leakage current and temperature variation are discussed in details. To minimise the leakage current, double insulation and shield potential rising have been used, while to minimise the temperature variation, internal thermostatization with Peltier elements placed on the boxes of Hamon transfers has been used.

Keywords: traceability, resistance standards, Hamon transfers, high resistance, precision measurements.

1. Wstęp

Wzorzec jednostki rezystancji, wykorzystujący kwantowy efekt Halla (QHR), przechowywany w Głównym Urzędzie Miar (GUM), charakteryzuje się najwyższą jakością metrologiczną. Jego wartość jest przyjęta bez odniesienia do innych wzorców jednostki miary rezystancji. Pracuje on w temperaturze poniżej 0,5 K, w polu magnetycznym o indukcji od 4 T do 8 T, odtwarza wartość rezystancji 12906,404 Ω lub 6453,202 Ω z niepewnością rzędu 10⁻⁹.

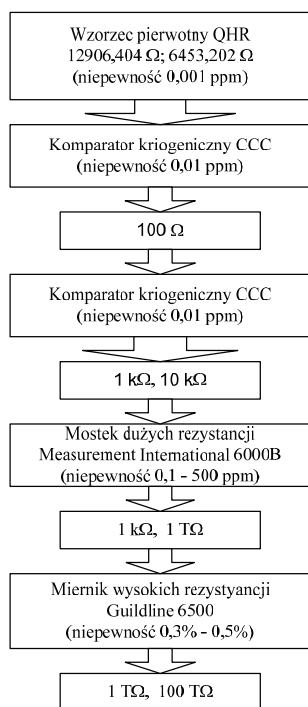
Dla zapewnienia spójności pomiarowej niezbędny jest odpowiedni system przekazywania (transferowania) jednostki rezystancji od wzorca QHR do wzorców wtórnych o różnych wartościach rezystancji. W tej publikacji autorzy przedstawiają swoje prace nad takim systemem transferowania jednostki rezystancji w kierunku dużych wartości.

Jednostka rezystancji z wzorca QHR jest transferowana do wzorców rezystancji o nominalnej wartości 100 Ω za pomocą kriogenicznego komparatora prądowego CCC (Cryogenic Current Comparator) z niepewnością rzędu 10⁻⁸ [4]. Przekazywanie jednostki rezystancji do wzorców o większych wartościach, do 10 kΩ, wykonuje się również tym samym komparatorem CCC. W klasycznym systemie (rys. 1), stosowanym w GUM, jednostka rezystancji do wyższych wartości niż 10 kΩ przekazywana jest przy pomocy wysoko precyzyjnego mostka 6000B firmy Measurements International [4], który umożliwia przeniesienie jednostki rezystancji na rezystory wzorcowe od 1 kΩ do 1 GΩ z niepewnością rozszerzoną, na poziomie ufności 0,95, wynoszącą od 0,1 ppm do 5 ppm, a w specjalnej konfiguracji również w zakresie 10 GΩ – 1 TΩ z niepewnością 20 – 500 ppm [5]. Do dalszego przeniesienia jednostki na wzorce o wartościach od 1 TΩ do 100 TΩ stosuje się teraomierz 6500 firmy Guildline, który w tym zakresie mierzy z niedokładnością rzędu 0,3% ÷ 0,5% [6].

Dokładność przekazywania jednostki rezystancji w tym systemie ograniczona jest dokładnością zastosowanych przyrządów pomiarowych.

2. System przekazywania jednostki rezystancji bazujący na transferach Hamona

Dokładność przekazywania jednostki rezystancji można zwiększyć przez zastosowanie w systemie transferów Hamona [7-12]. Obecnie w Głównym Urzędzie Miar, przy współdziałaniu pracowników Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej, trwają prace nad stworzeniem takiego systemu. Strukturę tego systemu przedstawiono na rys. 2. Podobnie jak w systemie klasycznym, w systemie tym, wartość rezystancji z wzorca pierwotnego QHR przekazywana jest na wysoko stabilny wzorec wtórny o wartości nominalnej 100 Ω, a następnie na wzorce 1 kΩ i 10 kΩ za pośrednictwem komparatora CCC.



Rys. 1. Klasyczny system przekazywania jednostki rezystancji z wzorca QHR do wzorców wtórnych o dużych wartościach

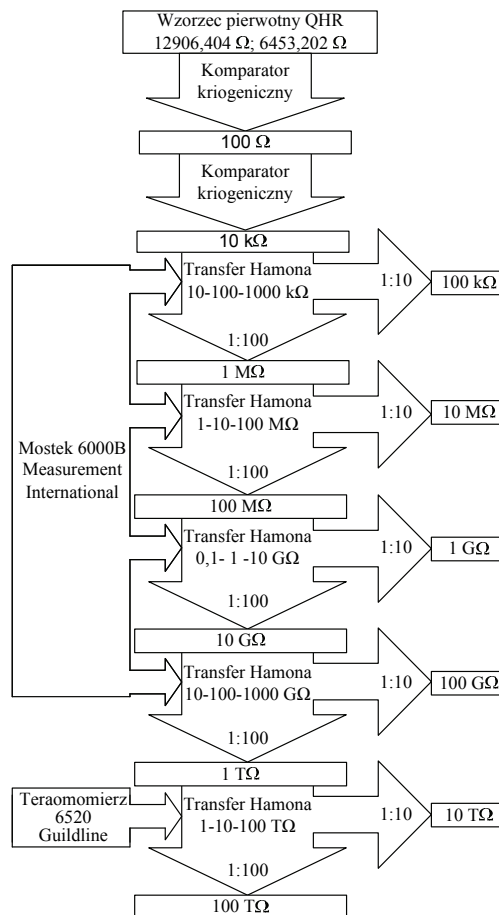
Fig. 1. Classical system of unit resistance transfer from the QHR to primary standard of high resistance value

Przeniesienie jednostki rezystancji z wzorca 10 kΩ na wzorce o wartościach do 1 TΩ odbywa się przy pomocy czterech transferów Hamona i wysoko precyzyjnego mostka 6000B firmy Measurements International. Do dalszego przeniesienia jednostki na wzorce 10 TΩ i 100 TΩ wykorzystuje się transfer 1-10-100 TΩ, współpracujący z tym samym przyrządem pomiarowym, który był stosowany w tym zakresie w systemie klasycznym. Może to być więc teraomierz firmy Guildline 6520 [13] lub 6500 (obecnie już nie produkowany). Można tu zastosować 6½ cyfrowy miernik wysokich rezystancji firmy Keithley 6430 (do 200 V) [14] albo 5½ cyfrowy 6517B (do 1000 V) [15]. A jeżeli chcemy uzyskać ekstremalnie wysoką dokładność, to można zastosować teraomierzy mostek firmy Measurement International [16], dla którego niepewność w tym zakresie pomiarowym wynosi 150-250 ppm.

Transfery Hamona umożliwiają bardzo dokładne porównanie rezystancji rezystorów wzorcowych, różniących się wartościami 10 i 100 krotnie. Pomiar wykonuje się tymi samymi przyrządami stosowanymi do pomiarów bezpośrednich, ale metodą podstawienia porównując rezystancje w stosunku 1:1, a więc z dokładnością większą niż dokładność samego przyrządu. Tutaj dokładność porównania ograniczona jest rozdzielczością i czułością użytego przyrządu pomiarowego oraz poziomem szumów i zakłóceń.

Dla pełnego zrealizowania systemu przekazywania jednostki rezystancji w zakresie od 10 kΩ do 100 TΩ niezbędnych jest pięć

transferów: 10-100-1000 kΩ, 1-10-100 MΩ, 0,1-1-10 GΩ, 10-100-1000 GΩ i 1-10-100 TΩ. Transfery te powinny mieć bardzo dużą dokładność. Dlatego w ich konstrukcji należy zminimalizować wszystkie błędy systematyczne i przypadkowe.



Rys. 2. System przekazywania jednostki rezystancji z użyciem transferów Hamona

Fig. 2. System of resistance unit transfer with use of Hamon transfers

3. Transfery Hamona

Transfer Hamona składa się z 10 precyzyjnych rezystorów o jednakowych wartościach nominalnych, które mogą być połączone szeregowo lub równolegle oraz szeregowo-równolegle (rys. 3) [7, 8, 17-20]. W przypadku połączenia szeregowo-równoległego rezystorów transferu, łączy się równolegle trzy gałęzie, trzech szeregowo połączonych rezystorów, a rezystor dziesiąty pozostaje poza układem połączeń.

Stosunek rezystancji rezystorów transferu połączonych szeregowo do rezystancji połączonych równolegle określony jest wyrażeniem [10, 11]:

$$\frac{R_S}{R_R} = 100 \frac{1 + \bar{d}}{1 + \bar{d} - \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (d_i - \bar{d})^2} = 100 \left(1 + \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (d_i - \bar{d})^2 \right) = 100(1 + d_{S/P}), \quad (1)$$

w którym: R_S jest rezystancją rezystorów połączonych szeregowo, R_R – rezystancją połączenia równoległego tych samych rezystorów, d_i – względna poprawka wartości i -tego rezystora w relacji do wartości znamionowej, \bar{d} – średnią arytmetyczną względnych poprawek d_i rezystorów.

Z relacji (1) wynika, że stosunek rezystancji połączenia szeregowego do połączenia równoległego rezystorów transferu R_S/R_R wynosi 100 z bardzo małą względną poprawką

$$d_{s/r} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (d_i - \bar{d})^2.$$

Wartość tej poprawki jest zależna od tolerancji rezystorów wykorzystanych w budowie transferu. Dla transferu złożonego z rezystorów 100 kΩ o tolerancji wartości rezystancji ±0,005 % poprawka ta mieści się w granicach ±10⁻¹⁰, a dla rezystorów o wartości 10 TΩ i tolerancji ±2% poprawka ta jest rzędu ±10⁻⁵. Można je więc pominąć, a ich graniczne wartości traktować jako składowe niepewności transferu Hamona.

Stosunek rezystancji konfiguracji połączenia szeregowego rezystorów do konfiguracji połączenia szeregowo-równoległego tych rezystorów jest określony równaniem [10, 11]:

$$\frac{R_S}{R_{SR}} = 10 \frac{1 + \bar{d}}{1 + \bar{d} - 0,1d_1} \cong 10(1 + 0,1d_1), \quad (2)$$

w którym: R_{SR} jest wypadkową rezystancją połączenia równoległego trzech gałęzi, z których każda złożona jest z trzech szeregowo połączonych rezystorów, d_1 - względną poprawką rezystora R_1 pozostającego poza układem połączeń (rys. 3).

Przybliżenie zastosowane w równaniu (2) powoduje błąd rzędu 10⁻¹⁶. Natomiast względna poprawka d_1 rezystora pozostającego poza układem połączeń, dla rezystorów 100 kΩ o tolerancji ±0,005%, jest w granicach ±10⁻⁶, a dla rezystorów 10 TΩ o tolerancji ±2% w granicach ±10⁻³. Wynika stąd, że stosunek rezystancji połączenia szeregowego do szeregowo-równoległego rezystorów transferu R_S/R_{SR} jest również znany i, z uwzględnieniem poprawki pozostającego poza układem połączeń rezystora R_1 , wynosi 10. Zatem transfery rezystancji mogą umożliwić bardzo dokładne przeniesienie wartości rezystancji wzorcowych w stosunku 1:10 i 1:100, ale przy spełnieniu bardzo ważnego warunku, że w czasie pomiarów wartości rezystancji rezystorów w transferach będą stałe. W rzeczywistości rezystancja rezystorów w transferach może ulegać fluktuacjom pod wpływem wahań temperatury, zmian napięcia przyłożonego do rezystorów i wilgotności otoczenia. Czynniki te, obok upływności izolacji, są głównymi źródłami niepewności stosunku transferów.

Szczegółową analizę wpływu upływności izolacji na dokładność transferów Hammona przedstawiono w publikacjach [10, 11]. Gdyby w transferach zastosowano klasyczny pojedynczy układ izolacji z politetrafluoroetylenem (PTFE), który charakteryzuje się ekstremalnie wysoką rezystywnością skrośną 10¹⁸ Ωcm i rezystancja izolacji wynosiła 10¹⁶ Ω, to uzyskano by stosunek rezystancji $R_S/R_R = 100$ z niedokładnością określoną błędami podanymi w drugiej kolumnie tabeli 1.

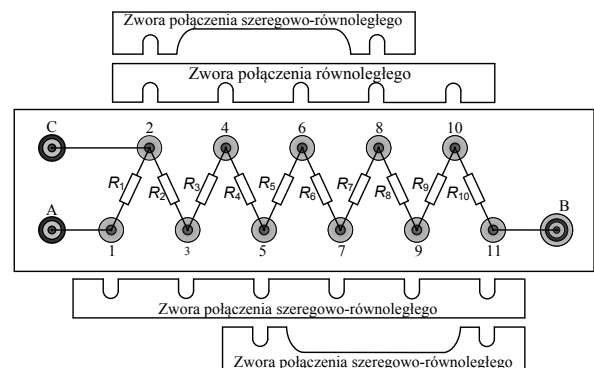
Dla transferów 10 GΩ–100 GΩ–1 TΩ i 1 TΩ–10 TΩ–100 TΩ błędy spowodowane upływnością izolacji są bardzo duże i wynoszą odpowiednio około 0,02% i 2%. Ich wartość można zmniejszyć budując transfery z podwójną izolacją i podnoszeniem potencjałów ekranów do wartości potencjałów połączeń rezystorów transferu. Wymaga to zastosowania dodatkowego transferu pomocniczego. Jeżeli różnice rezystancji odpowiednich rezystorów w obu transferach będą się mieścić w granicach ±1%, to błędy spowodowane upływnością izolacji zmaleją 100-krotnie i przyjmą wartości podane w kolumnie trzeciej tabeli 1.

Tab. 1. Błędy względne transferów spowodowane upływnością izolacji do masy
Tab. 1. Relative errors of the transfers caused by the insulation leakage to the ground

Transfer	Błąd względny spowodowany upływnością izolacji	
	pojedynczej	podwójnej
10 – 100 – 1000 kΩ	-1×10 ⁻¹¹	-
1 – 10 – 100 MΩ	-1,7×10 ⁻⁸	-
0,1 – 1 – 10 GΩ	-1,7×10 ⁻⁶	-
10 – 100 – 1000 GΩ	-1,7×10 ⁻⁴	-1,7×10 ⁻⁶
1 – 10 – 100 TΩ	-1,7×10 ⁻²	-1,7×10 ⁻⁴

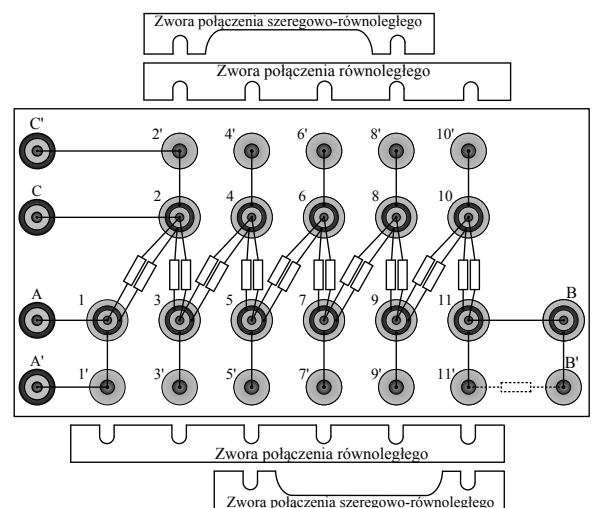
Prototypowy transfer 10–100–1000 kΩ zbudowano z rezystorów 100 kΩ, o tolerancji ±0,005%, typu HR5032N, firmy PRC, a transfer 1–10–100 MΩ - z takich samych rezystorów, lecz o wartości nominalnej 10 MΩ. Transfer 0,1–1–10 GΩ zbudowano z rezystorów 1 GΩ typu 3811 firmy WELWYN o tolerancji 1%, a transfer 10–100–1000 GΩ - z takich samych rezystorów, ale o wartości nominalnej 100 GΩ. Natomiast transfer 1–10–100 TΩ zaprojektowano z rezystorów 10 TΩ typu 3812 tej samej firmy o podobnych parametrach.

W pierwszych trzech transferach zastosowano klasyczny układ pojedynczej izolacji względem masy z PTFE, a rezystory połączone z zaciskami laboratoryjnymi znajdują się w powietrzu (rys. 3). Natomiast w transferach 10–100–1000 GΩ i 1–10–100 TΩ zastosowano podwójny układ izolacji z ekranami, których potencjały podnoszone są do wartości potencjałów zacisków transferu głównego. Służy temu transfer pomocniczy (rys. 4).



Rys. 3. Płyta czołowa transferu Hamona z pojedynczą izolacją: R_1 – R_{10} – rezystory transferu, 1-11 – zaciski laboratoryjne, A, C – koncentryczne złącze typu N, B – koncentryczne złącze typu TRIAX

Fig. 3. The front plate of Hamon transfer with single insulation: R_1 – R_{10} – resistors of the transfer, 1-11 – binding posts, A, C – coaxial connectors type N, B – coaxial connector type TRIAX



Rys. 4. Płyta czołowa transferu Hamona z podwójną izolacją: 1-11 i 1'-11' – zaciski laboratoryjne transferu głównego i pomocniczego, A, A', C, C' – koncentryczne złącze typu N, B – koncentryczne złącze typu TRIAX, B' – dodatkowy zacisk laboratoryjny

Fig. 4. The front plate of Hamon transfer with double insulation: 1-11 and 1'-11' – primary and secondary binding posts, A, A', C, C' – coaxial connectors type N, B – coaxial connector type TRIAX, B' – additional binding post

Zmiany połączenia rezystorów w transferach z układu szeregowego na równoległy i szeregowo-równoległy dokonuje się przy użyciu miedzianych zwór dokręcanych zaciskami laboratoryjnymi znajdującymi się na płytach czołowych transferów Hamona (rys. 3 i 4). Do połączenia transferów z zewnętrzną aparaturą pomiarową

służą koncentryczne złącza typu N (do podłączenia z wysokim potencjałem, np. źródłem napięcia) i typu TRIAX (do podłączenia z niskim potencjałem, np. miernikiem prądu).

W celu zminimalizowania wpływu wilgotności powietrza rezystory transferów umieszczone są w hermetycznych aluminiowych obudowach. Obudowy te chronią również transfery przed zewnętrznymi zakłóceniami elektromagnetycznymi.

Zmiany temperatury rezystorów są jednymi z najistotniejszych czynników wpływających na dokładność transferów. Dla zminimalizowania tych zmian na aluminiowych obudowach umieszczono dwa ogniwa Peltiera zasilane z kontrolera temperatury, sterowanego z czujnika Pt-100 umieszczonego wewnątrz obudowy transferu. Ciepło z ogniwa Peltiera odprowadzane jest poprzez radiatory wyposażone w wentylatory. Widoczne są one z lewej i prawej strony na zdjęciach zbudowanych transferów (rys. 5 i 6).



Rys. 5. Transfer Hamona z pojedynczą izolacją
Fig. 5. Hamon transfer with single insulation



Rys. 6. Transfer Hamona z podwójną izolacją
Fig. 6. Hamon transfer with double insulation

Rezystory wysokoomowe charakteryzują się dużymi współczynnikami napięciowymi zmian rezystancji. Dla zminimalizowania ich wpływu, pomiary należy tak wykonywać, ażeby napięcie występujące na każdym rezystorze było w czasie pomiarów zawsze takie samo. Można ewentualnie wprowadzać poprawki na zmianę napięcia, ale są one także obciążone niepewnością.

Należy zwrócić uwagę na długi czas ustalania się prądu w rezystorach wysokoomowych. Nie należy wykonywać pomiarów rezystancji przed ustaleniem się wartości z wymaganą dokładnością. Dla rezystorów teraomowych czas ten może wynosić kilka, a nawet kilkadziesiąt minut.

4. Wnioski

Skonstruowane, prototypowe transfery są testowane w Laboratorium Wzorców Wielkości Elektrycznych Zakładu Elektrycznego GUM. Wyniki pomiarów z zastosowaniem transferu 10 k Ω -100 k Ω -1 M Ω potwierdzają założenia teoretyczne. Uzyskana

niepewność pomiarów jest dwukrotnie mniejsza niż przy wykorzystaniu dotychczas stosowanego komparatora 6000 B.

Wstępne pomiary z wykorzystaniem transferów 1–10–100 M Ω oraz 0,1–1–10 G Ω również wskazują na ich poprawne działanie. Określenie niepewności pomiarów uzyskanych z wykorzystaniem tych transferów będzie jednak możliwe po zakończeniu badań. W przypadku transferów 10–100–1000 T Ω i 1–10–100 T Ω zaobserwowano wyraźny wpływ podnoszenia potencjału ekranu. Przy zastosowaniu tego rozwiązania rezystancja mierzona zmniejszała się, co oznacza minimalizację prądów upływnościowych.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008 - 2010 jako projekt badawczy rozwojowy nr N R01 0013 04.

5. Literatura

- [1] Jeckelmann B., Jeanneret B.: The quantum Hall effect as an electrical resistance standard. *Measurement Science and Technology*, vol. 14 (2003), s. 1229-1236.
- [2] Nawrocki W., Wawrzyniak M.: *Zjawiska kwantowe w metrologii elektrycznej*. Wyd. Politechniki Poznańskiej 2003.
- [3] Dudek E., Mosiądz M.: Wzorce jednostek miar rezystancji i napięcia elektrycznego a podstawowe stałe fizyczne. *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 53 bis (2007), nr 9 bis, s. 82-85.
- [4] Domańska-Myśliwiec D., Mosiądz M., Snopek L.: Od kwantowego efektu Halla do rezystora wzorcowego – system przekazywania jednostki miary. *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 53 (2007), nr 9 bis, s. 78-81.
- [5] Measurements International: Model 6000B Automated high resistance ratio bridge.
- [6] Guildline Instruments: Model 6500A Programmable digital teraohmmeter.
- [7] Lisowski M., Krawczyk K.: Przekazywanie jednostki rezystancji od wzorca opartego na kwantowym efekcie Halla do wysokoomowych rezystorów wzorcowych. *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 53 (2007), nr 9, s. 88-91.
- [8] Lisowski M., Krawczyk K., Dudek E., Mosiądz M.: System przekazywania jednostki rezystancji od wzorca pierwotnego QHR do wzorców o dużych wartościach rezystancji. *Mat. VIII Konf. Naukowej „Systemy pomiarowe w badaniach naukowych i w przemyśle”*. Ofic. Wyd. Uniwersytetu Zielonogórskiego 2010, s. 99-102.
- [9] National Institute of Standards and Technology: NIST Measurement Service for DC Standard Resistors. NIST Technical Note 1458, December 2003.
- [10] Lisowski M., Krawczyk K.: Analiza wpływu rezystancji izolacji na dokładność wysokoomowych transferów Hamona. *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 85 (2009), nr. 2, s. 75-78.
- [11] Lisowski M., Krawczyk K.: Insulation resistance influence on high resistance Hamon transfer accuracy. *Metrology and Measurements Systems*, vol. 16 (2009), nr 1, s. 33-45.
- [12] Lisowski M., Krawczyk K.: System for resistance unit transfer from 10 k Ω up to 100 T Ω based on Hamon transfers. 2010 Conference on Precision Electromagnetic Measurement – Digest. Daejeon, Korea 2010, s. 637-638.
- [13] Guildline Instruments: Model 6520 Programmable digital teraohmmeter.
- [14] Keithley: Model 6514 Programmable Electrometer – Sub-femtoamp remote sourcemeter instrument.
- [15] Keithley: Model 6517B Electrometer/High Resistance Meter.
- [16] Measurements International: Tera Ω Bridge. Dual Source resistance bridge.
- [17] Dudziewicz J. (red.) i inni.: *Etalony i precyzyjne pomiary wielkości elektrycznych*. Wyd. WKiŁ, Warszawa 1982, s. 156-170.
- [18] Elmquist R.E., Jarrett D.G., Jones G.R., Marlin E.K., Shields S.H., Dziuba R.F.: NIST Measurement Service for DC Standard Resistors. National Institute of Standards and Technology. Technical Note 1458, December 2003.
- [19] Jarrett D.G.: Evaluation of guarded high-resistance Hamon Transfer Standards. *IEEE Trans. Instrum. Measure.*, Vol. 48 (1999), No. 2, pp. 324-328.
- [20] Jarrett D.G.: A 10 T Ω per step Hamon transfer standard. 2002 Conference on Precision Electromagnetic Measurements, Ottawa, Ontario, Canada, June 2002, Conf. Digest, pp. 54-55.