

Michał LISOWSKI, Krystian KRAWCZYK, Bartłomiej KOCJAN

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

## Koncepcja dwutorowego systemu przekazywania jednostki rezystancji od wzorca pierwotnego QHR do wzorców o wartościach do 100 TΩ

Prof. dr inż. Michał LISOWSKI

W 1968 r. ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Wrocławskiej. Stopień doktora uzyskał w 1975 r., doktora habilitowanego w 1990, a tytuł profesora w 2007. Pracuje na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej. W swoich pracach naukowych zajmuje się precyzyjnymi pomiarami elektrycznymi, problemami wzorcowania przyrządów pomiarowych, systemami pomiarowymi do badania nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego i badaniami materiałów elektrotechnicznych.

e-mail: [michal.lisowski@pwr.wroc.pl](mailto:michal.lisowski@pwr.wroc.pl)



Mgr inż. Bartłomiej KOCJAN

W 2011 r. ukończył studia na kierunku Elektrotechnika na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej. Obecnie jest doktorantem na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej. W swoich pracach naukowych zajmuje się problemami związanymi z metrologią elektryczną oraz skomputeryzowanymi systemami pomiarowymi.

e-mail: [bartlomiej.kocjan@pwr.wroc.pl](mailto:bartlomiej.kocjan@pwr.wroc.pl)



Dr inż. Krystian 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. Uzyskał stopień doktora w 2011 r. W swoich pracach naukowych zajmuje się zagadnieniami związanymi z metrologią elektryczną w szczególności precyzyjnymi pomiarami rezystancji oraz skomputeryzowanymi systemami pomiarowymi

e-mail: [krystian.krawczyk@pwr.wroc.pl](mailto:krystian.krawczyk@pwr.wroc.pl)



**Keywords:** resistance standards, Hamon transfers, resistance measurements, measurements systems, measurement uncertainty.

### 1. Wstęp

Dla zapewnienia spójności pomiarowej niezbędne jest zdefiniowanie jednostek miar i odtworzenie ich przez wzorce pierwotne oraz przekazanie tych jednostek do innych wzorców i przyrządów pomiarowych. W tym celu tworzy się systemy przekazywania jednostki miary od wzorca pierwotnego do wzorców wtórnych. Najwyższą dokładność mają wzorce wtórne, porównywane bezpośrednio z wzorcami pierwotnymi.

Rezystancja jest bardzo ważną wielkością elektryczną. Od jej dokładności pomiaru zależy dokładność pomiarów wielu innych wielkości elektrycznych i nieelektrycznych. Dla wielu czujników pomiarowych parametrem wyjściowym jest rezystancja i od dokładności pomiarów tej wielkości zależy dokładność pomiarów wielkości wejściowych, na przykład temperatury, naprężeń mechanicznych, a nawet masy.

Obecnie najdokładniejszym wzorcem rezystancji jest wzorzec pierwotny QHR (Quantum Hall Resistance), oparty na kwantowym efekcie Halla, który odtwarza wartość rezystancji 6453,202 Ω lub 12906,404 Ω z niepewnością względną rzędu  $10^{-9}$  [1-3]. Wzorzec ten odtwarza definitywnie jednostkę rezystancji i jest na wyposażeniu wielu narodowych instytutów metrologicznych. W Polsce taki wzorzec znajduje się w Głównym Urzędzie Miar (GUM) [4]. Dla zapewnienia spójności pomiarowej rezystancji, niezbędne jest stworzenie systemu przekazywania jednostki rezystancji od wzorca pierwotnego QHR do wzorców wtórnych świadków.

### 2. Istniejący system przekazywania jednostki rezystancji

Autorzy, w ramach projektu badawczego rozwojowego, opracowali system przekazywania jednostki rezystancji od wzorca QHR do wzorców świadków dużych rezystancji [5, 7, 8]. W systemie tym, podobnie jak w systemie dotychczas stosowanym w GUM, przekazuje się wartość rezystancji od wzorca pierwotnego QHR do wysokostabilnego wzorca wtórnego świadka o wartości nominalnej 100 Ω za pośrednictwem komparatora kriogenicznego z niepewnością rzędu  $10^{-8}$  [5, 6].

Koncepcja dalszego przekazywania jednostki rezystancji została przedstawiona w pracy [7]. Przewidywała ona przekazywanie wartości rezystancji z jednego transferu na drugi za pośrednictwem wzorców rezystancji. W toku dalszych prac nad systemem wyeliminowano pośredniczące rezystory wzorcowe, a jednostka rezystancji przekazywana jest bezpośrednio z wyjścia jednego transferu na wejście drugiego transferu. Schemat tego systemu przedstawia rysunek 1.

### Streszczenie

Proponowany system jest uzupełnieniem zrealizowanego, w ramach projektu badawczego rozwojowego, systemu przekazywania jednostki rezystancji od wzorca pierwotnego QHR do wzorców wtórnych o dodatkowy drugi tor. Zapewni to weryfikację uzyskanych wyników, co ma bardzo istotne znaczenie dla pomiarów o najwyższych dokładnościach. Wymagać to będzie skonstruowania nowych czterech transferów rezystancji: (0,1-1-10) MΩ, (10-100-1000) MΩ, (1-10-100) GΩ i (0,1-1-10) TΩ.

**Słowa kluczowe:** wzorce rezystancji, transfery Hamona, pomiary rezystancji, system pomiarowy, niepewność pomiarów.

### Idea of double path system for resistance unit transfer from QHR primary standard to 100 TΩ standards

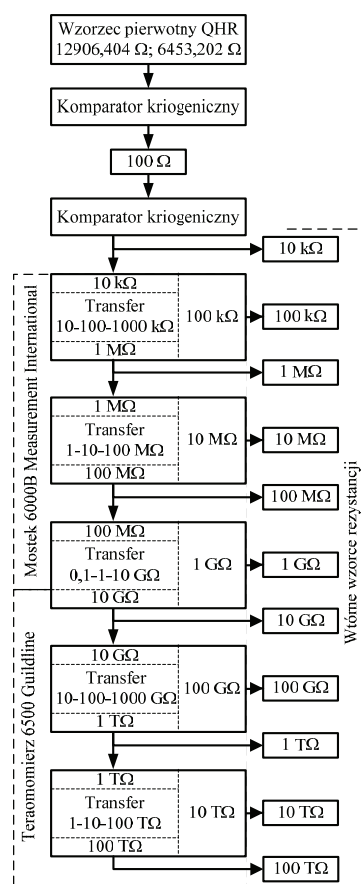
#### Abstract

Authors describe the resistance unit transfer system, from the primary standard QHR to 100 TΩ standards based on Hamon transfers, which they developed (Fig. 1) [5, 6, 8]. Resistance unit is transferred from the QHR to 100 Ω standard with the Cryogenic Current Comparator (CCC), and then with the same comparator to 10 kΩ standard. Next to standard up to 1 GΩ Hamon, the transfers with Measurement International 6000B bridge are used. Above 1 GΩ up to 100 TΩ Hamon transfers and Guildline 6500 teraohmmeter are used. Hamon transfers which are used in the system are sealed in metal boxes which protect from humidity and external interferences; they are also thermostated with instability of  $\pm 0.01$  °C [5, 9]. Described system is very accurate if voltage applied to Hamon transfer resistors is constant. In practice this is impossible and corrections due to voltage change are necessary, what is main limitation of this system accuracy. Furthermore measurement equipment does not enable sufficient voltage regulation what causes additional errors. Secondary standards are not thermally stabilized, and for teraohmmeter it is impossible to set measurement time. Described system enables resistance unit transfer with only one path, this does not allow to verify results of measurements. Therefore authors propose to equip existing system with second path, based on additional four Hamon transfers (Fig. 2.). Authors also propose to develop special thermostats for secondary standards and active-arm bridge (Fig. 3.) [10].

Za pomocą komparatora kriogenicznego, jednostka rezystancji przenoszona jest z rezystora wzorcowego  $100\ \Omega$  do wzorca o wartości nominalnej  $10\ \text{k}\Omega$ . W zakresie  $10\ \text{k}\Omega$  do  $1\ \text{G}\Omega$  przeniesienie jednostki rezystancji odbywa się za pomocą transferów rezystancji ( $10\text{-}100\text{-}1000$ )  $\text{k}\Omega$ , ( $1\text{-}10\text{-}100$ )  $\text{M}\Omega$  i ( $0,1\text{-}1\text{-}10$ )  $\text{G}\Omega$  oraz wysoko precyzyjnego mostka  $6000\text{B}$ . Porównania bezpośrednie rezystancji w stosunku  $1\text{:}1$  wykonywane są metodą przedstawienia z niepewnością określoną niezczułością i rozdzielczością mostka.

Przeniesienie jednostki rezystancji w zakresie od  $1\ \text{G}\Omega$  do  $100\ \text{T}\Omega$  odbywa się za pomocą transferów ( $10\text{-}100\text{-}1000$ )  $\text{k}\Omega$  i ( $1\text{-}10\text{-}100$ )  $\text{T}\Omega$  oraz teraomierza firmy Guildline, model  $6500\text{A}$ , a porównania rezystancji wykonuje się metodą podstawienia.

Dla realizacji systemu zbudowano dwa transfery ( $10\text{-}100\text{-}1000$ )  $\text{k}\Omega$  i ( $1\text{-}10\text{-}100$ )  $\text{M}\Omega$ , z klasycznym układem pojedynczej izolacji, oraz trzy transfery podwójne ( $0,1\text{-}1\text{-}10$ )  $\text{G}\Omega$ , ( $10\text{-}100\text{-}1000$ )  $\text{G}\Omega$  i ( $1\text{-}10\text{-}100$ )  $\text{T}\Omega$ , w których dla zminimalizowania prądów upływnościowych, a zatem i zwiększenia ich dokładności, zastosowano układ podwójnej izolacji i podnoszenie potencjałów ekranów złącz do potencjałów transferu głównego [3, 5].



Rys. 1. Opracowany przez autorów system przekazywania jednostki rezystancji  
Fig. 1. System for resistance unit transfer developed by the authors

Wszystkie transfery umieszczono w zamkniętych hermetyzowanych obudowach metalowych. Odizolowano je cieplnie od otoczenia i wyposażono w wewnętrzne systemy termostatacji, oparte na ogniach Peltiera, sterowane z mikroprocesorowego kontrolera temperatury, współpracującego z zewnętrznym komputerem. Zapewnia to utrzymanie stałej temperatury rezystorów transferów w granicach  $\pm 0,01\ ^\circ\text{C}$  [5, 9].

Transfery rezystancji są wzorcami licznymi stosunku rezystancji. Po wywzorcowaniu ich w jednej z konfiguracji połączenia, mogą pełnić one rolę przełączalnych rezystorów wzorcowych świadków.

Opisany system przekazywania jednostki rezystancji, za pośrednictwem zbudowanych transferów poddano badaniom testującym w Głównym Urzędzie Miar (GUM) i stwierdzono jego przydatność do przekazywania jednostki rezystancji, ale zaobserwowano kilka jego niedogodności.

Wysoką dokładność stosunku rezystancji transferów, można uzyskać, jeżeli w czasie pomiarów na każdym rezystorze transferu będzie takie samo napięcie. Jest to możliwe tylko wokół jednego transferu. Przejście z jednego transferu na drugi transfer (bezpośrednio lub pośrednio za pomocą wzorca świadka) powoduje konieczność zmiany napięcia na niższe, praktycznie o rząd. Zmiana napięcia powoduje zmiany rezystancji rezystorów transferu i wzorca świadka. Dla zminimalizowania wpływu tych zmian na dokładność systemu wprowadzono poprawki napięciowe. Poprawek tych nie można jednak wyznaczyć z odpowiednio dużą dokładnością i mają one dość duży udział w niepewności pomiarów.

Jednym z problemów przedstawionego systemu jest brak stabilizacji temperatury wysokoomowych rezystorów wzorcowych świadków. Mimo klimatyzacji w laboratorium temperatura waha się w granicach  $\pm 1\ ^\circ\text{C}$ , a to powoduje znaczący wpływ na niekontrolowaną zmianę rezystancji wzorca i niepewność jego wartości.

Kolejnym problemem jest niedopasowanie aparatury pomiarowej, znajdującej się w GUM, do spełnienia wymagań współpracy z transferami. Mostek  $6000\text{B}$  firmy Measurement International wyposażony jest w źródło zasilania o skokowo nastawianych napięciach ( $1, 2, 5, 10, 20, 50, 100$ )  $\text{V}$  [10]. Dla spełnienia warunku identycznego napięcia  $U$  na każdym rezystorze transferu niezbędne jest napięcie  $3U$  (w konfiguracji szeregowo-równoległej) i  $10U$  (w konfiguracji szeregowej), gdzie  $U$  jest napięciem w konfiguracji równoległej. Niestety mostek nie ma możliwości nastawienia napięcia  $3U$  (brakuje napięcia  $30\ \text{V}$ ).

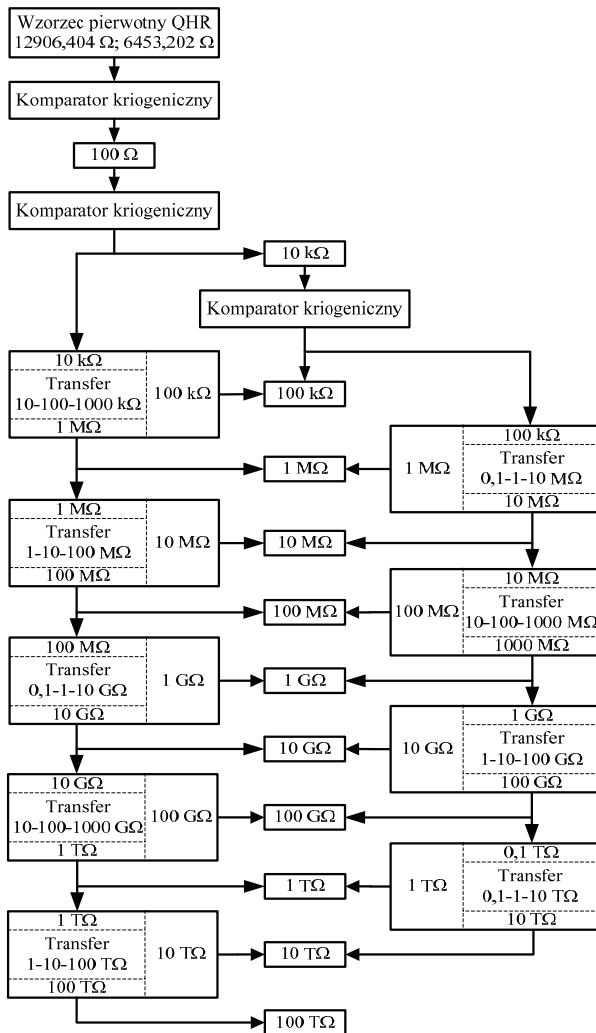
Podobny problem występuje przy posługiwaniu się teraomierzem  $6500$  firmy Guildline, który ma źródło wewnętrzne o napięciach ( $1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000$ )  $\text{V}$  [11]. Tutaj też nie ma możliwości nastawy napięcia  $3U$ . Ponadto przyrząd ten ma zbyt małą dokładność i niewystarczającą czułość, a działanie jego oparte na metodzie całkującej bardzo utrudnia pomiary. Ponadto przyrząd ten uniemożliwia nastawienie odpowiednio długiego czasu pomiaru, który jest wymagany dla rezystorów o wartościach teraomowych.

System ten ma jeszcze jedną istotną niedogodność. Realizuje on przekazywanie jednostki z wzorca pierwotnego do wzorców świadków tylko jednym torem („ścieżką”), którego dokładności obecnie nie można zweryfikować. Dla weryfikacji wyników nadania wartości wzorcem świadkom niezbędne jest opracowanie, co najmniej drugiej równoległej „ścieżki” przekazywania wartości rezystancji.

### 3. Proponowany system przekazywania jednostki rezystancji

Obecnie autorzy proponują opracowanie nowego systemu z dwoma równoległymi torami przekazywania jednostki rezystancji, który będzie wykorzystywał obecny system. Schemat tego systemu przedstawiono na rysunku 2. System ten ma podwójną „ścieżkę” przekazywania wartości rezystancji w zakresie od  $100\ \text{k}\Omega$  do  $10\ \text{T}\Omega$ .

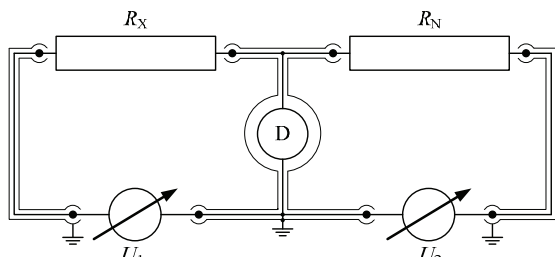
Komparatorem kriogenicznym można przenieść jednostkę rezystancji z wzorca  $10\ \text{k}\Omega$  na wzorzec  $100\ \text{k}\Omega$  i wejście transferu ( $0,1\text{-}1\text{-}10$ )  $\text{M}\Omega$ . Wartości rezystancji wyjściowych z tego transferu mogą być przekazane do wzorców świadków  $1\ \text{M}\Omega$  i  $10\ \text{M}\Omega$ , a wartość rezystancji wyjściowej w połączeniu szeregowym tego transferu może być przekazana do następnego transferu ( $10\text{-}100\text{-}1000$ )  $\text{M}\Omega$ . Dalej, aż do  $10\ \text{T}\Omega$ , przekazywanie wartości rezystancji odbywa się w identyczny sposób.



Rys. 2. Proponowany system przekazywania jednostki rezystancji  
Fig. 2. The proposed system for resistance unit transfer

Realizacja systemu wymaga zbudowania czterech nowych transferów rezystancji: (0,1-1-10) MΩ, (10-100-1000) MΩ, (1-10-100) GΩ i (0,1-1-10) TΩ. Transfery te miałyby zbliżoną konstrukcję do tych już zbudowanych.

Do porównań wartości rezystancji transferów i rezystorów wzorcowych w zakresie do 1 GΩ można wykorzystać dotychczas stosowany mostek 6000B firmy Measurement International, przy zastosowaniu innego odpowiedniego źródła zasilania, a powyżej zastosowano by wysoko precyzyjny mostek aktywny z dwoma źródłami napięć, przedstawiony na rysunku 3 [12, 13].



Rys. 3. Wysoko precyzyjny mostek aktywny do pomiarów dużych rezystancji  
Fig. 3. The high precision active-arm bridge for high resistance measurements

Mostek ten umożliwiałby pomiary rezystancji w zakresie od 100 kΩ do 100 TΩ. Dokładność tego typu mostka zależy przede wszystkim od dokładności zastosowanych źródeł napięcia oraz od

czułości wskaźnika zera. Należy, zatem zastosować najdokładniejsze źródła napięcia stałego oraz wysokiej klasy elektrometr, jako wskaźnik zera. Dla utrzymania stałej temperatury rezystorów wzorcowych świadków zastosowano by specjalnie skonstruowane termostaty, oparte na ogniwach Peltiera, podobne do tych stosowanych w transferach [5, 8]. Takie rozwiązanie w znacznym stopniu ograniczyłoby wpływ temperatury na wyniki uzyskiwanych pomiarów oraz na ich niepewność.

## 4. Wnioski

W ramach projektu badawczego rozwojowego opracowano jednorodny system przekazywania jednostki rezystancji [5, 8]. System ten ma jednak pewne wady, które mogłyby zostać wyeliminowane lub ich wpływ mógłby zostać zminimalizowany przy realizacji rozszerzonego systemu dwutorowego. Do zbudowania takiego systemu z podwójnym torem przekazywania jednostki rezystancji, niezbędne jest skonstruowanie dodatkowych czterech transferów rezystancji, zbudowania wysokostabilnych termostatów do utrzymywania stałej temperatury wzorców rezystancji oraz opracowanie specjalnego aktywnego mostka z dwoma precyzyjnymi źródłami napięcia, w którym detektorem będzie bardzo czuły elektrometr. Realizacja tego rozszerzonego systemu będzie przedmiotem dalszych prac autorów.

*Publikacja powstała w ramach prac statutowych finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.*

## 5. Literatura

- [1] Hartland A.: The quantum Hall effect and resistance standard. *Metrologia*, vol. 29 (1992), s. 175-190.
- [2] Witt T. J.: Electrical resistance standards and the quantum Hall effect. *Review of Scientific Instruments*, vol. 69 (1998), nr 8, s. 2823-2843.
- [3] 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.
- [4] Domańska-Mysłiwiec D., Mosiądz M., Snopek L.: Od kwantowego efektu Halla do rezystora wzorcowego – system przekazywania jednostki miary. *Pomiary Automatyka Kontrola*, nr 9 bis (2007), s. 78-81.
- [5] Krawczyk K.: Wzorcowanie rezystorów wzorcowych o wysokich wartościach rezystancji za pośrednictwem transferów Hamona. Praca doktorska, Wydział Elektryczny PWr., Wrocław 2011.
- [6] NPL: Cryogenic Current Comparator Bridge datasheet.
- [7] Lisowski M., Krawczyk K., Dudek E., Mosiądz M.: System przekazywania jednostki rezystancji od wzorca opartego QHR do wzorców 100 TΩ, oparty o transfery Hamona. *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 56 (2010), nr 11, s. 1290-1293.
- [8] Lisowski M., Krawczyk K.: System for resistance unit transfer form 10 kΩ up to 100 TΩ with new Hamon transfers. *CPEM 2012 Digest*, s. 382-383.
- [9] Lisowski M., Krawczyk K., Mazurkiewicz Ł.: Nowa konstrukcja wysokoomowych transferów Hamona. *Materiały VIII Konferencji Naukowo-Technicznej PPM'2011*, s. 48-51.
- [10] Measurement International: Model 6000B Automated 100 Volt High Resistance Bridge datasheet.
- [11] Guildline: Model 6500A Programmable Digital Teraohmmeter datasheet.
- [12] Jarrett D. G.: Automated Guarded Bridge for Calibration of Multimegohm Standard Resistors from 10 MΩ to 1 TΩ. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 46, nr. 2, 1997, s. 325-328.
- [13] Schumacher B., Melcher J.: Automated high-value resistance calibration up to 1 PΩ. *CPEM 2010 Digest*, s. 635-636.

otrzymano / received: 28.06.2012

przyjęto do druku / accepted: 02.08.2012

artykuł recenzowany / revised paper