

Dorota DOMAŃSKA-MYŚLIWIEC, Michał MOSIĄDZ, Lidia SNOPEK

GŁÓWNY URZĄD MIAR, LABORATORIUM WZORCÓW NAPIĘCIA I OPORU, UL. ELEKTORALNA 2, 00-139 WARSZAWA

Od kwantowego efektu Halla do rezystora wzorcowego – system przekazywania jednostki miary

Dorota DOMAŃSKA-MYŚLIWIEC

Jest wieloletnim pracownikiem Laboratorium Wzorców Napięcia i Oporu Zakładu Metrologii Elektrycznej Głównego Urzędu Miar. Zajmuje się problematyką przenoszenia jednostki rezystancji na najwyższym poziomie w zakresie $0,0001 \Omega$ do $100 \text{ k}\Omega$. W swojej pracy doskonali metody wzorcowania oraz analizy wyników pomiarowych.



e-mail: electricity@gum.gov.pl

Lidia SNOPEK

Jest długoletnim pracownikiem Laboratorium Wzorców Napięcia i Oporu Zakładu Metrologii Elektrycznej Głównego Urzędu Miar. Zajmuje się zagadnieniami transferu jednostki rezystancji na najwyższym poziomie w zakresie $100 \text{ k}\Omega$ do $100 \text{ T}\Omega$. Doskonali oraz rozwija nowoczesne metody wzorcowania wysokich rezystancji.



e-mail: electricity@gum.gov.pl

Michał MOSIĄDZ

Pracownik Laboratorium Wzorców Napięcia i Oporu Zakładu Metrologii Elektrycznej Głównego Urzędu Miar. W pracy zawodowej skupia się na tematyce odtwarzania i przenoszenia jednostek rezystancji oraz napięcia od wzorców kwantowych. Interesuje się doskonaleniem systemów pomiarowych, opracowywaniem nowych metod pomiarowych oraz zagadnieniami szacowania niepewności.



e-mail: electricity@gum.gov.pl

Streszczenie

W referacie przedstawiono system przekazywania jednostki miary od układu odtwarzania jednostki rezystancji do rezystorów wzorcowych. Omówiono zasadę działania systemu odtwarzania jednostki rezystancji oraz wybrane problemy występujące podczas jej przekazywania do rezystorów wzorcowych. Przedstawiono również stanowiska wzorcowujące służące temu celowi.

Słowa kluczowe: wzorzec rezystancji, rezystor wzorcowy, jednostka miary, kwantowy efekt Halla, Ω

From quantum Hall effect to standard resistor – transfer of resistance unit

Abstract

In the article structure of transferring resistance unit from quantum Hall effect to standard resistors is described. System of reproducing resistance unit fundamentals, chosen transfer problems, and calibration systems are also described.

Keywords: resistance standard, measurement unit, quantum Hall effect, Ω

1. Wprowadzenie

W ciągu ostatnich lat dokonał się ogromny postęp w dziedzinie wzorcowania rezystancji. Najnowsze odkrycia naukowe umożliwiły dokonanie przełomu i wprowadzenie nowych standardów w tej dziedzinie. Dotychczas metrologia elektryczna oparta była na wzorcach materialnych – w Polsce najwyższym wzorcem rezystancji był wzorzec grupowy złożony z 6-ciu rezystorów o wartościach 1Ω . Stosowane metody pomiarowe ograniczały możliwości przekazywania jednostki do niewystarczającego dla dzisiejszej metrologii poziomu dokładności (10^{-6}). Wynikało to z konstrukcji stosowanych mostków pomiarowych i ówczesnych możliwości technicznych.

Odkrycie kwantowego efektu Halla przez Klausa von Klitzinga w 1980 roku [1] i wykorzystanie go do odtwarzania jednostki rezystancji z nieosiągalną dotychczas dokładnością 10^{-9} [2] wprowadziło nowe standardy do metrologii elektrycznej. Równoległe postępy technologiczne udostępniły niespotykanej dotąd dokładności sprzęt pomiarowy nowej generacji. Urządzenia te, wykorzystujące najnowsze osiągnięcia elektroniki i fizyki, pozwalają dziś na wyeliminowanie wielu strat dokładności oraz zapewniają dużo wyższą stabilność i powtarzalność przenoszenia jednostki miary na wzorce niższego rzędu. Również polska administracja miar podąża z duchem czasu i dostosowała krajowy system przenoszenia jednostki miary rezystancji, do najwyższych światowych standardów klientom krajowym.

2. Odtwarzanie jednostki rezystancji

Stosunkowo niedawno odkryte zjawisko kwantowego efektu Halla szybko znalazło zastosowanie w metrologii elektrycznej. Dzięki niemu stało się możliwe odtwarzanie jednostki rezystancji bezpośrednio ze zjawisk kwantowych, a co za tym idzie – możliwe stało się określenie jego wartości wprost z podstawowych stałych fizycznych. Wartości rezystancji pochodzącej od wzorców grupowych określano na podstawie porównań elementów wzorca między sobą. Dzięki wzorcowi kwantowemu jednostka rezystancji jest niezależna, a ogólnosiątkowy system miar jest tworzony dzięki porównaniom kluczowym wzorców tego typu między sobą.

Znany od ponad 100 lat efekt Halla polega na odchyleniu toru ruchu elektronów pod wpływem prostopadłego przyłożonego pola magnetycznego, wskutek działania siły Lorentza [3]. Podobne zjawisko zachodzi w cienkich płytkach półprzewodnikowych. Rozważając to zjawisko w geometrii dwuwymiarowej przy zastosowaniu praw mechaniki kwantowej, okazuje się, że elektrony swobodne pod wpływem pola magnetycznego mogą zajmować tylko dozwolone tory ruchu, uwarunkowane przez dozwolone poziomy energetyczne – poziomy Landaua. W zależności od wartości pola magnetycznego w danym paśmie energetycznym, poziomy te są oddalone od siebie o ściśle określoną wartość przerwy energetycznej ΔE . W gazie elektronowym w obszarze przypowierzchniowym złącza półprzewodnikowego umieszczonego w prostopadłym polu magnetycznym, w warunkach kriogenicznych występuje kwantowy efekt Halla [1]. Polega on na zdyskretyzowanych zmianach rezystancji próbki w funkcji indukcji magnetycznej.

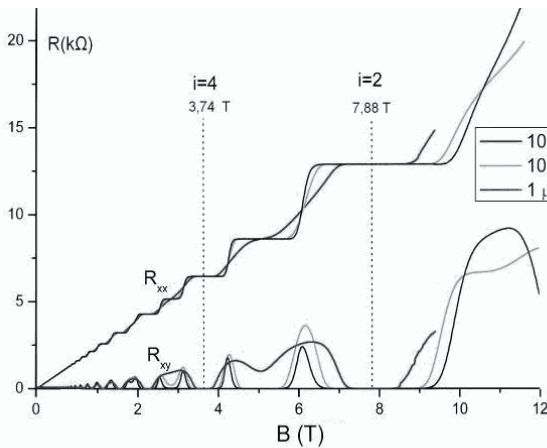
Zależność wartości rezystancji Halla $R_H(i)$ od indukcji magnetycznej w heterostrukturze GaAs/AlGaAs pokazuje rys. 1.

Z charakterystyki wynika wprost, że po ustaleniu odpowiednich warunków kriogenicznych po włączeniu pola magnetycznego o odpowiednio dobranej wartości próbki Halla charakteryzuje się

rezystancją poprzeczną o ściśle określonej wartości, zdefiniowanej równaniem [4]

$$R_H(i) = \frac{h}{ie^2} = \frac{R_K}{i}, \quad (1)$$

gdzie $R_H(i)$ – dyskretyzowana wartość rezystancji Halla dla i -tego plateau, R_K - stała Klitzinga wynosząca 25 812,807 Ω [5], i – liczba oznaczająca plateau.



Rys. 1. Charakterystyka $R(B)$ próbki Halla
Fig. 1. Characteristic $R(B)$ of Hall bar

System do odtwarzania jednostki miary rezystancji, pracujący w oparciu o kwantowe zjawisko Halla, produkcji Cryogenics Ltd. [6], znajduje się w Laboratorium Wzorców Napięcia i Rezystancji Zakładu Metrologii Elektrycznej Głównego Urzędu Miar. Umożliwia on odtwarzanie jednostki rezystancji z niepewnością względną rzędu 10^{-9} . Odtwarza rezystancję na dwóch poziomach plateau – dla plateau 4 przy $B = 3,74$ T o wartości ok. 6453 Ohm oraz dla plateau 2 przy $B = 7,88$ T o wartości ok. 12906 Ohm. W pełni zaspokaja to potrzeby polskiej metrologii. System ten pokazano na rys. 2. Stanowi on najwyższy poziom krajowego systemu miar, a jego parametry plasują go w ścisłej światowej czołówce.



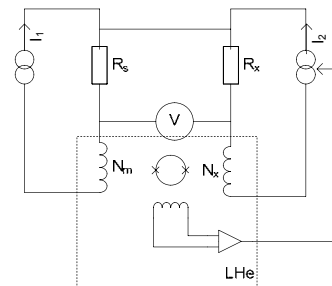
Rys. 2. Układ odtwarzania jednostki rezystancji
Fig. 2. Resistance unit reproducing system

3. Komparator kriogeniczny

Jednostka rezystancji odtworzona za pomocą opisanego systemu jest przenoszona na rezystor wzorcowy o wartości nominalnej 100 Ω firmy Tinsley. Rezystor ten umieszczony jest w specjalnym termostacie powietrznym, a jego temperatura pracy wynosi $34,5 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Stabilizacja taka jest wystarczająca dla uzyskania odtwarzalności i stabilności jego wartości. Wartość rezystancji tego najważniejszego w kraju rezystora jest na bieżąco aktualizowana dzięki okresowemu wzorcowaniu od systemu Halla.

Do przenoszenia jednostki na opisany rezystor wykorzystywany jest komparator kriogeniczny CCC [6]. Rezystor

wzorcowy, stanowiący rezystor odniesienia dla dalszego przekazywania jednostki rezystancji, jest wzorcowany metodą bezpośredniego porównania. Komparator dzięki zastosowaniu układów opartych o elementy nadprzewodzące umożliwia uzyskanie dokładności przenoszenia jednostki na poziomie 10^{-8} . Tak wysokie parametry metrologiczne uzyskano dzięki zastosowaniu czujnika SQUID [7] jako detektora zera. Konstrukcja komparatora oparta jest o specjalnej konstrukcji mostek transformatorowy, przedstawiony na rys. 3. Cewka pierwotna, umieszczona wewnątrz ekranu nadprzewodzącego, przekazuje prąd do dwóch uzwojeń nawiniętych na rdzeniu toroidalnym. Oba uzwojenia wtórne są identyczne i nawinięte przeciwobnie. Dzięki ekranowaniu magnetycznemu pole magnetyczne pochodzące od prądów w cewkach indukowanych nie wpływa na odczyty czujnika SQUID. W układzie mostkowym zawarto 24 zestawy tego typu uzwojeń, co umożliwia osiągnięcie różnych przełożeń komparatora. Po wybraniu jednego z nich możliwe są pomiary stosunku prądów nawet 200:1. Należy jednak pamiętać, że wraz ze wzrostem przełożenia maleje dokładność pomiarów. Najczulsze pomiary są możliwe przy komparacji rezystorów w stosunku 1:1. Jednak rozwiązanie takie zastosowano by umożliwić transfer jednostki z układu jej odtwarzania (ok. 25 k Ω) do rezystora wzorcowego 100 Ω . Układ pomiarowy operuje prądami z zakresu 50 mA \div 10 μ A. Układ detektora zera ze względu na zastosowanie materiałów nadprzewodzących pracuje w warunkach kriogenicznych – sonda pomiarowa musi być zanurzona w ciekłym helu. Ze względu na wysoką czułość i podatność SQUIDA na zakłócenia zewnętrzne cały układ pomiarowy musi pracować w pomieszczeniu odpowiednio ekranowanym od wpływu czynników zewnętrznych. Oczywiście jest, że tak wygórowane możliwości pomiarowe są możliwe do osiągnięcia przy zachowaniu odpowiednich warunków obiektów wzorcowanych – szczególnie ich stabilizacji termicznej w kąpiel olejowej.



Rys. 3. System odtwarzania jednostki rezystancji
Fig. 3. Cryogenic current comparator circuit

Po wstępnym zrównoważeniu układu mostka indukcyjnego, sygnał z czujnika SQUID, będącego detektorem zera, poprzez sprzężenie zwrotne, reguluje wartość prądu przepływającego przez dodatkową cewkę kompensacyjną, tak dobierając jego wartość, by osiągnąć stan jak najbardziej zbliżony do stanu zrównoważenia. Po wykonaniu cyklu korekt i zrównoważeniu mostka następuje wyznaczenie wyniku pomiaru.

Czujnik SQUID w tym układzie mierzy różnicę strumieni magnetycznych indukowanych przez uzwojenie pierwotne i uzwojenie wtórne wraz z cewką kompensacyjną. Dzięki jego czułości czułość całego układu na zmiany strumienia magnetycznego indukowanego przez układ cewek sprzężonych sięga poziomu pojedynczego fluksonu

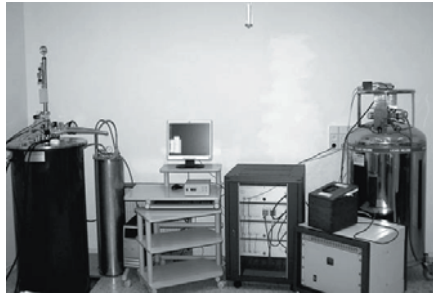
$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ Wb}. \quad (2)$$

Oprogramowanie systemu pomiarowego jako wynik podaje wyliczoną na podstawie nastaw pomiarowych i parametrów systemu wartość D , będącą iloczynem stosunku porównywanych rezystorów i wybranej ilości przełożeń. Na jej podstawie możliwe jest wyznaczenie nieznannej wartości rezystora R_x z zależności

$$R_x = R_s \frac{N_m}{N_x} \left(1 - \frac{D}{10^6} \right), \quad (3)$$

w której R_s – wartość rezystora odniesienia, N_x , N_m – wybrane uzwojenia w stanie zrównoważenia układu.

Praca komparatora SQUID jest w pełni zautomatyzowana dzięki specjalnemu oprogramowaniu stworzonemu w środowisku LabView. Sam proces przeniesienia jednostki trwa około 30 min, również dalsza obróbka uzyskanych danych pomiarowych również jest czasochłonna. Uzyskane wyniki komparacji należy opracować pod względem poprawności metrologicznej i poddać dalszej analizie celem oszacowania budżetu niepewności pomiaru. System pomiarowy ilustruje rys. 4.



Rys. 4. System odtwarzania i transferu jednostki rezystancji
Fig. 4. Resistance unit reproducing and transfer system

Omówiony system zastępuje dotychczas pracujący system przenoszenia jednostki oparty o komparator rezystancji konstrukcji Guildline [8], umożliwiający przenoszenie jednostki rezystancji na poziomie niepewności pomiarowej 10^{-7} . Komparator ten ze względów konstrukcyjnych nie jest w stanie zapewnić przeniesienia jednostki od systemu jej odtwarzania opartego na zjawisku Halla. Oprócz zwiększenia możliwości i dokładności pomiarów, nowoczesny system pozwala na zautomatyzowanie pracy oraz wyeliminowanie nie tylko niedoskonałości wzorców grupowych, ale również błędów wprowadzanych przez czynnik ludzki – operatora komparatora.

4. Komparatory rezystancji

Opisany w poprzednim rozdziale komparator kriogeniczny przeznaczony jest do przenoszenia jednostki rezystancji na najwyższym poziomie, do najważniejszych wzorców rezystancji, które w dalszych ogniwach łańcucha przenoszenia jednostki stanowią wzorce odniesienia dla rezystorów niższego rzędu. Ze względu na dokładność procedury pomiarowej tym systemem można wzorcować jedynie najbardziej stabilne rezystory wzorcowe. Do dalszego przenoszenia jednostki miary, na rezystory o dokładności i powtarzalności wartości niższego rzędu, stosowane są mniej dokładne komparatory rezystancji firmy Measurement International. Są to układy mostkowe typu 6000B i 6010C wraz z oprzyrządowaniem pomocniczym [9]. Ich zakresy pomiarowe pokrywają typoszereg rezystorów od 0,1 mΩ do 1 TΩ. Układ komparatora oparto na konstrukcji Kustersa [10].

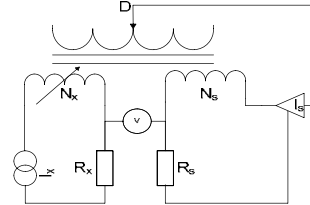
Zasada działania komparatora niskoomowego typu 6010C opiera się na wymuszaniu przez oba porównywane rezystory różnych prądów, tak dobranych, aby spadki napięć na obu rezystorach były takie same. Po wstępnym pomiarze wartości obu rezystancji następuje dobór odpowiednich uzwojeń komparatora i dzięki automatycznej korekcie prądów płynących w gałęziach mostka następuje jego zrównoważenie. Po zrównoważeniu mostka stosunek prądów przepływających przez każdy z rezystorów wyznacza stosunek mierzonych rezystancji.

Schemat mostka typu 6010C ilustruje rys. 5. W chwili zrównoważenia mostka różnica napięć na obu opornikach wynosi zero, co wykrywa detektor zera. Można zapisać warunek równowagi mostka jako

$$I_s N_s = I_x N_x. \quad (4)$$

Po przekształceniu otrzymamy równanie opisujące poszukiwany stosunek dwóch mierzonych rezystancji k , na podstawie którego obliczana jest poszukiwana wartość rezystancji

$$k = \frac{R_x}{R_s} = \frac{I_s}{I_x} = \frac{N_x}{N_s}. \quad (5)$$

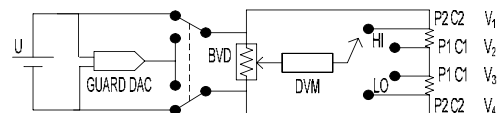


Rys. 5. Schemat komparatora 6010C: I_x – źródło obwodu pierwotnego, I_s – regulowane źródło prądowe, N_x – uzwojenie pierwotne regulowane, N_s – stałe uzwojenie wtórne, R_x – nieznan rezystor, R_s – rezystor odniesienia, D – detektor równowagi, V – detektor zera

Fig. 5. 6010C comparator circuit: I_x – master current source, I_s – variable current source, N_x – variable primary coil, N_s – fixed secondary coil, R_x – unknown resistor, R_s – standard resistor, D – ampere turn balance detector, V – null detector

Komparator stałoprądowy typu 6010C pozwala przenosić jednostkę w zakresie rezystancji 0,1 mΩ ÷ 100 kΩ z niepewnością rozszerzoną względną rzędu 0,05 ppm ÷ 0,5 ppm, w zależności od przełożenia mostka i wartości rezystancji.

Do przeniesienia jednostki na rezystory wysokoomowe (w zakresie 100 kΩ ÷ 1 TΩ) wykorzystywany jest komparator typu 6000B będący dzielnikiem napięcia, opartym na konstrukcji Cutkosky'ego. Wyznaczenie stosunku mierzonych rezystancji polega na wyznaczeniu stosunku spadków napięć mierzonych na obu porównywanych rezystorach, po wymuszeniu przez nie przepływu takich samych prądów. Zasadę działania i schemat blokowy komparatora typu 6000B ilustruje rys. 6.



Rys. 6. Schemat komparatora 6000B: U – zasilacz napięciowy, DVM – nanowoltomierz cyfrowy, BVD – dzielnik napięcia, HI, LO – rezystor o wyższej i niższej wartości

Fig. 6. 6000B comparator circuit: U – voltage source, DVM – digital nanovoltmeter, BVD – binary voltage divider, HI, LO – higher and lower value resistor

Stosunek mierzonych rezystancji wyznaczany jest na podstawie zależności

$$k = \frac{R_x}{R_s} = \frac{V_1 - V_2}{V_3 - V_4} = \frac{V_1/U - V_2/U}{V_3/U - V_4/U}, \quad (6)$$

Wynikającej wprost z konstrukcji komparatora.

W zależności od wartości porównywanych rezystorów, komparator umożliwia pomiary z niepewnością na poziomie 0,1 ppm (do 100 MΩ) do 500 ppm (dla rezystorów 1 TΩ). Przeniesienie jednostki miary na rezystory o wartościach powyżej 1 GΩ odbywa się w specjalnym układzie pomiarowym, w którym stosowane jest bocznikowanie mierzonego rezystora przez rezystor o mniejszej, znanej wartości rezystancji.

Zestaw obu komparatorów rezystancji zastępuje stosowane wcześniej mostki rezystancyjne, które umożliwiały przenoszenie jednostki rezystancji z dużo gorszą niepewnością. Pozwoliły również na uzupełnienie stanowiska teraomomierza. Wzorcowanie na najwyższym dostępnym poziomie dokładności jest bardzo czasochłonne, ze względu na konieczność równoważenia mostka przy przepływie bardzo niskich prądów (rzędu części nA przy najwyższych wartościach rezystancji).

Dlatego pomiary nie wymagające aż tak wysokiej dokładności pomiarowej, a także wzorcowanie przyrządów niższej klasy (np. wysokoomowych oporników dekadowych) nadal odbywa się za pomocą teraomierza. Ponadto jedynie teraomierz pokrywa zakres najwyższych rezystancji, powyżej 1 T Ω . Z tych względów pozostaje on nadal niezbędnym wyposażeniem laboratorium.

Stanowiska pomiarowe wykorzystujące komparatory 6010C i 6000B pokazuje rys. 7. Ich możliwości pomiarowe potwierdza akredytacja PCA oraz porównania międzynarodowe. Ostatnio przeprowadzonymi porównaniami przy wykorzystaniu nowego wyposażenia pomiarowego były porównania kluczowe pomiarów rezystancji w zakresie 100 Ω oraz wysokorezystancyjne w zakresie pomiarów 10 M Ω oraz 1 G Ω .



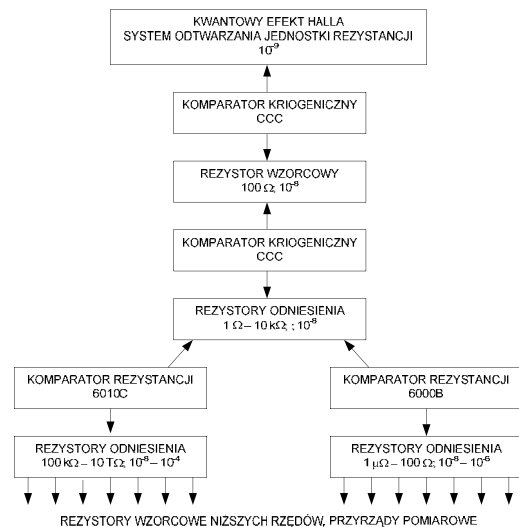
Rys. 7. Stanowiska pomiarowe oparte o komparatory rezystancji
Fig. 7. Measurement systems using resistance comparators

5. Podsumowanie

Dzięki rozbudowie i unowocześnieniu stanowisk wzorcujących Laboratorium Wzorców Napięcia i Oporu GUM przebudowano krajowy system przenoszenia jednostki miary rezystancji. Znacznemu rozszerzeniu uległy możliwości pomiarowe laboratorium oraz poziom wzorcowań. Można powiedzieć, że polska metrologia dołączyła do światowej czołówki w dziedzinie odtwarzania i przekazywania jednostki rezystancji. Możliwe jest nie tylko odtwarzanie jednostki z kwantowego efektu Halla, ale i przekazywanie jej przez komparatory rezystancji na wzorce niższych rzędów. System przekazywania jednostki rezystancji ilustruje rys. 8. Rezystory wzorcowane w naszym laboratorium uzyskują Świadczenia Wzorcowania z wartościami niepewności o kilka rzędów lepszymi niż wcześniej. Stało się to możliwe dzięki nowym odkryciom naukowym i rozwojowi techniki, ale również dzięki pracy całego zespołu w zakresie wdrażania nowych metod pomiarowych i doskonalenia metod szacowania niepewności.

W tabeli poniżej zamieszczono porównanie metod pomiarowych stosowanych w Laboratorium. Pierwszy wiersz zawiera wyniki wzorcowania uzyskane komparatorem 6010C od rezystora wzorcowego, wzorcowanego wcześniej bezpośrednio od dawnego wzorca grupowego. Wiersz środkowy zawiera wyniki uzyskane podczas wzorcowania tego samego rezystora od opornika wzorcowego, na którego jednostka rezystancji została przeniesiona bezpośrednio z efektu Halla. Natomiast ostatni wiersz stanowi wynik komparacji tych samych rezystorów wykonanej bezpośrednio komparatorem kriogenicznym. Widoczne jest polepszenie uzyskanej niepewności pomiarowej przy wykorzystaniu nowoczesnych technik pomiarowych.

Stosunek Rs:Rx	Rx	u(Rx)	$U_{rel}(Rx)$
10:100 (6010C)	99,99898	0,00008	8,0E-07
100:100 (6010C)	99,99877695	0,0000089	8,9E-08
100:100 (CCC)	99,99914661	0,0000033	3,3E-08



Rys. 8. Polski system przekazywania jednostki rezystancji
Fig. 8. System of resistance unit transfer in Poland

Laboratorium nadal poprawia możliwości pomiarowe. Prowadzone są prace w zakresie optymalizacji warunków pomiaru – stabilizacji środowiskowej rezystorów i eliminacji wpływu zakłóceń zewnętrznych. Trwają też prace mające na celu rozwój metod szacowania niepewności pomiarowej. Wśród prac zmierzających ku udoskonaleniu metod pomiarowych rozpoczęto badania nad zastosowaniem transferów Hamona [11] do przekazywania jednostki rezystancji z jeszcze wyższą dokładnością i powtarzalnością. Umożliwi to pominięcie pośrednich etapów przenoszenia jednostki, dzięki czemu zostaną wyeliminowane źródła błędów generowane na kolejnych stopniach transferu.

6. Literatura

- [1] von Klitzing K.: The Quantised Hall Effect. Nobel Prize Lectures, Szwecja 1985.
- [2] Nawrocki W., Wawrzyniak M.: Zjawiska kwantowe w metrologii elektrycznej. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2003.
- [3] Sawieliew I.W.: Wykłady z Fizyki. Tom 2. PWN, Warszawa 1994.
- [4] Dudek E.: Kwantowy efekt Halla i jego zastosowanie do odtwarzania jednostki miary oporu elektrycznego. Podstawowe Problemy Metrologii, Ustroń, maj 2005.
- [5] 2002 CODATA Recommended Values. <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/bibliography.html>
- [6] Primary Resistance Standard QHR 2000. Cryogenic Limited. <http://www.cryogenic.co.uk>
- [7] Stankowski J., Czyżak B.: Nadprzewodnictwo. WNT, Warszawa 1999.
- [8] Sutcliffe J.: A New DC resistance bridge and DC potentiometer based on the Kusters current comparator. Instrument Society of America, 22nd ISA Conference and Exhibit. 1967 Chicago, USA.
- [9] Measurement International, <http://www.mintl.pl>.
- [10] Praca zbiorowa: Etalony i precyzyjne pomiary wielkości elektrycznych. WKiŁ, Warszawa 1982.
- [11] Karett D.G.: Evaluation of guarded high-resistance Hamon transfer standards. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 48, 1999, 324-328.

Artykuł recenzowany