

# Wzorce wielkości elektrycznych oparte na zjawiskach kwantowych

Edyta Dudek, Michał Mosiądz, Marcin Orzepowski

Główny Urząd Miar – Zakład Elektryczny

Rozwój metrologii elektrycznej umożliwił odejście od wzorców materialnych na rzecz nowej klasy wzorców wielkości elektrycznych – wzorców kwantowych. Dzięki temu osiągnięto poprawę możliwości pomiarowych i jakości osiąganych wyników. Wzorcami kwantowymi są m. in. system odtwarzania jednostki napięcia elektrycznego (1 wolta) pracujący w oparciu o zjawisko Josephsona oraz system odtwarzania jednostki rezystancji (1 oma) wykorzystujący kwantowy efekt Halla. W artykule opisano podstawy fizyczne obu zjawisk, budowę systemów pomiarowych wykorzystujących te efekty, a także zmiany w systemie odtwarzania i przekazywania wspomnianych jednostek miar spowodowane wdrożeniem opisanych systemów.

## Quantum standards for electrical quantities

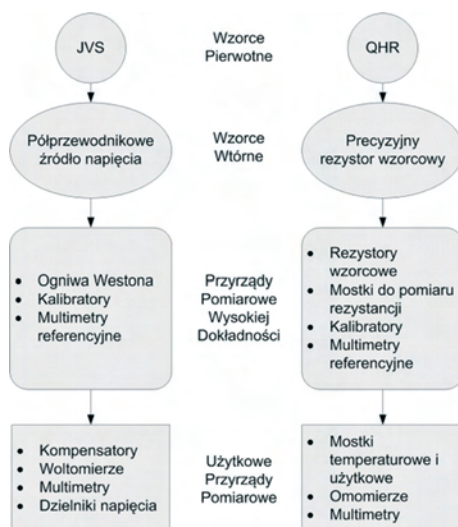
Progress in electrical metrology gave the possibility to switch from traditional standards based on material properties to primary quantum standards, which improved measurement capabilities and quality of measurement results. Quantum standards reproduce the dc voltage unit (1 volt) with the help of the Josephson effect and the unit of resistance (1 ohm) with the use of the quantum Hall effect. In this article, we describe both these quantum phenomena, measurement systems based on the two effects and changes in the unit transfer schemes caused by implementation of the new quantum standards.

## Wstęp

Miernictwo elektryczne stanowi istotną gałąź dzisiejszej metrologii. Wiele procesów pomiarowych odbywa się poprzez przetworzenie mierzonej wielkości fizycznej na proporcjonalną wielkość elektryczną – napięcie, prąd, impuls elektryczny. Przykładem może być pomiar temperatury przy pomocy platynowego czujnika rezystancyjnego Pt100 lub termopary [1]. W związku z szerokim zastosowaniem przetworników pomiarowych pracujących w oparciu o pomiar wielkości elektrycznych, Główny Urząd Miar, jako krajowa instytucja metrologiczna, musi zapewnić na terenie Polski spójny system odtwarzania i przekazywania jednostek miar wielkości elektrycznych. Aby sprostać tak ważnemu zadaniu, GUM powinien dysponować wzorcami o najlepszych parametrach metrologicznych. Realizacja systemu przekazywania jednostek miar wielkości elektrycznych przebiega na najwyższym światowym poziomie dzięki zastosowaniu nowoczesnych systemów pomiarowych, jakie stanowią wzorce pierwotne oparte na zjawiskach kwantowych.

## Hierarchiczny układ przekazywania jednostek miar wielkości elektrycznych

Utrzymywane w Zakładzie Elektrycznym GUM wzorce napięcia elektrycznego stałego oraz oporu elektrycznego są wzorcami pierwotnymi, tzn. takimi wzorcami jednostek miar, które są ustalone lub powszechnie uznane jako charakteryzujące się najwyższą jakością metrologiczną i których wartość jest przyjęta bez odniesienia do innych wzorców jednostki miary tej samej wielkości. Tym samym, kwantowe wzorce pierwotne stanowią najlepszą realizację jednostek miar, opartą na stałych fizycznych.

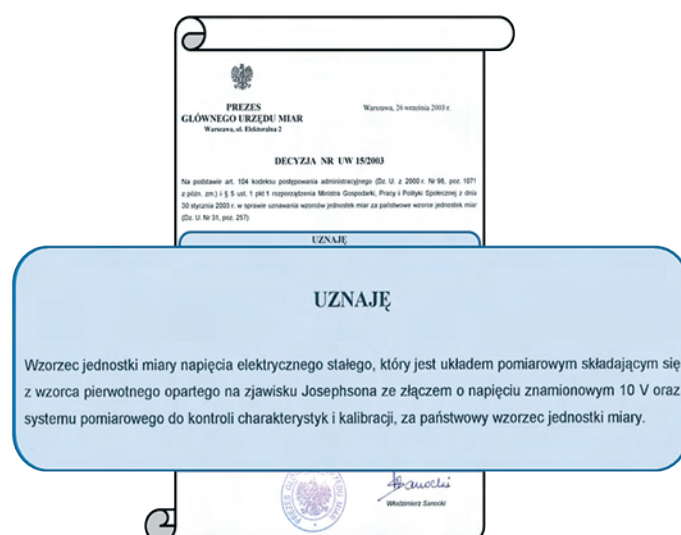


Rys. 1. Hierarchiczny układ przekazywania jednostek miar napięcia i rezystancji

Wzorce te stanowią najwyższy poziom hierarchii przekazywania jednostek [2]. Schemat hierarchii wzorcowania przedstawia rys. 1. Ze wzorcem pierwotnym w sposób bezpośredni porównywane są wzorce wtórne, stanowiące zwykle wzorce odniesienia laboratoriów wzorcujących. W przypadku napięcia elektrycznego stanowią je wysokiej klasy półprzewodnikowe źródła napięcia. Wzorcem wtórnym, w przypadku pomiarów rezystancji, są dokładne rezystory wzorcowe. Od wzorców wtórnych jednostka przekazywana jest na przyrządy pomiarowe wysokiej dokładności. To z nimi porównywane są użytkowe przyrządy pomiarowe.

## Wzorzec napięcia elektrycznego stałego

Wzorzec napięcia elektrycznego stałego stanowi system pomiarowy realizujący jednostkę wolta przy wykorzystaniu kwantowego zjawiska Josephsona. W 1962 roku Brian Josephson opisał zjawisko tunelowania elektronów przez złącze dwóch warstw nadprzewodnika rozdzielonych dielektrykiem [3], które potwierdzono eksperymentalnie w rok później.



Rys. 2. Decyzja Prezesa GUM uznająca JVS za wzorzec państwowy

Struktura taka została nazwana złączem Josephsona i stanowi główny element układu odtwarzania jednostki napięcia elektrycznego JVS (Josephson Voltage Standard).

W Głównym Urzędzie Miar stanowisko wzorca napięcia opartego na kwantowym efekcie Josephsona istnieje od 1998 roku. W roku 2003 JVS został ustanowiony Państwowym Wzorcem Jednostki Miary Napięcia Elektrycznego Stałego (rys. 2).



Rys. 3. Świadectwo państwowego wzorca napięcia

Rysunek 3 przedstawia świadectwo państwowego wzorca napięcia elektrycznego stałego, który stanowi układ pomiarowy z matrycą złącz Josephsona. Wzorzec JVS w GUM pozwala na odtwarzanie napięcia stałego z przedziału od -10 V do +10 V. Elementem wzorca jest także układ sterujący matrycą złącz Josephsona.

Pierwotny wzorzec napięcia przechowywany jest w klimatyzowanym pomieszczeniu Laboratorium Wzorców Wielkości Elektrycznych (rys. 4). Pracownia jest otoczona ekranem miedzianym, w celu tłumienia zakłóceń elektromagnetycznych. Stanowisko JVS, jak też półprzewodnikowe wzorce wtórne wymagają stabilnego napięcia zasilającego, dlatego też energia elektryczna dostarczana jest do laboratorium za pośrednictwem wysokiej klasy zasilacza UPS.



Rys. 4. Pracownia napięcia elektrycznego

## Zjawisko Josephsona

Pierwotne wzorce napięcia wykorzystują złącza Josephsona (JJ – Josephson Junction) do realizacji jednostki napięcia elektrycznego [5]. W metrologii wykorzystuje się zmienno-prądowe zjawisko Josephsona [6] zachodzące na złączach. Konwencjonalne wzorce wykorzystują strukturę zbudowaną z dwóch nadprzewodnikowych elektrod, które rozdziela cienka warstwa izolatora (struktura SIS), jak to przedstawiono na rys. 5. Cała struktura jest zanurzona w kriocieczy – najczęściej ciekłym helu. W tym stanie pojawiają się pary Coopera, które charakteryzuje taka sama energia i jedna funkcja falowa.



Rys. 5. Struktura złącz Josephsona stosowanych we wzorcach napięcia

Efekt Josephsona polega na tunelowaniu elektronów między dwoma nadprzewodnikami na granicy nadprzewodnik–izolator–nadprzewodnik. Prąd tunelujący pomiędzy dwiema nadprzewodzącymi elektrodami opisuje pierwsze równanie Josephsona [2], [6]

$$I = I_C \sin\varphi \quad (1)$$

gdzie  $I_C$  – prąd krytyczny złącza Josephsona,  $\varphi$  – różnica faz funkcji falowych par Coopera po przeciwnych stronach złącza.

Gdy do elektrod złącza SIS przyłożone jest napięcie stałe różne od zera, to przez to złącze przepływa prąd zmienny, którego częstotliwość powiązana jest z napięciem przez drugie równanie Josephsona

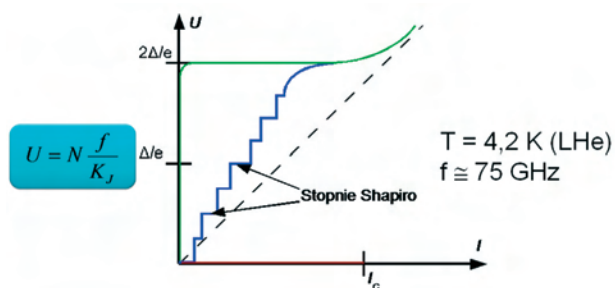
$$f = \frac{\partial\varphi}{\partial t} = \frac{4\pi Ue}{h} \quad (2)$$

gdzie  $f$  – częstotliwość,  $U$  – napięcie stałe,  $e$  – ładunek elektronu,  $h$  – stała Plancka.

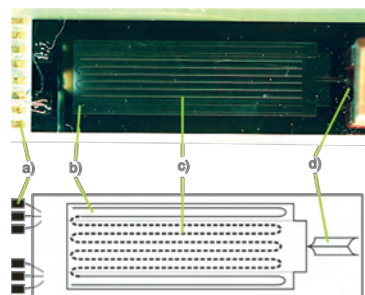
Wynika stąd, że proces ten można odwrócić, czyli oświetlając złącze Josephsona promieniowaniem mikrofalowym o stałej częstotliwości i przepuszczając przez nie stały prąd  $I$ , obserwuje się stopnie stałego napięcia na charakterystyce prądowo-napięciowej złącza SIS, zwane stopniami Shapiro [6]. Zastosowanie źródła sygnału mikrofalowego o dokładnej częstotliwości sprawia, że złącze odtwarza precyzyjnie napięcie stałe zgodnie z równaniem

$$U = f \left( \frac{2e}{h} \right)^{-1} = \frac{f}{K_J} = \frac{(f)GHz}{(483597,9)GHz/V} \quad (3)$$

gdzie  $K_J = 2e/h = 483597,9$  GHz/V jest stałą Josephsona [4]. Komitet CODATA zaleca obecnie wartość stałej Josephsona  $K_J = 483597,891 \cdot 10^9$  Hz/V [7].



Rys. 6. Charakterystyka prądowo-napięciowa złącza Josephsona



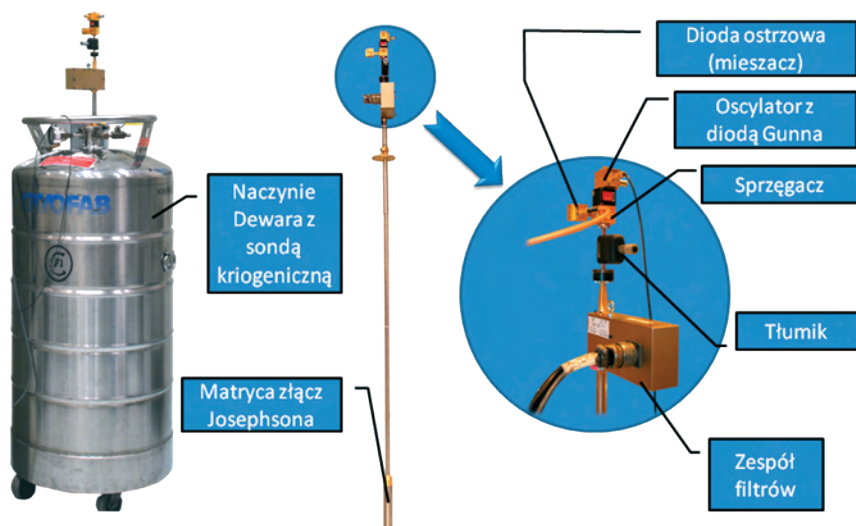
Rys. 7. Matryca złącz Josephsona: a) kontakty DC, b) rezystywne podłoże c) szeregowo połączone złącza SIS, d) antena mikrofalowa

Pod wpływem stałego prądu przepływającego przez złącze Josephsona pojawia się charakterystyczne skwantowanie zależności napięcia na elektrodach złącza SIS od przepływającego przez nie prądu. To za pomocą prądu polaryzującego złącze zmienia się wartość odtwarzanego napięcia, co przedstawia rysunek 6.

Ze względów praktycznych, wzorzec napięcia stanowi matryca połączonych szeregowo złącz Josephsona (rys. 7). Połączenie szeregowo wielu złącz JJ pozwala na konstrukcję źródła sygnału mikrofalowego o wysokiej stałości częstotliwości, dzięki zastosowaniu referencyjnego źródła częstotliwości oraz pętli PLL stabilizującej drgania elektryczne powstające w oscylatorze mikrofalowym. Matryca złącz Josephsona odtwarzająca napięcie  $\pm 10$  V zbudowana jest z ok. piętnastu tysięcy złącz.

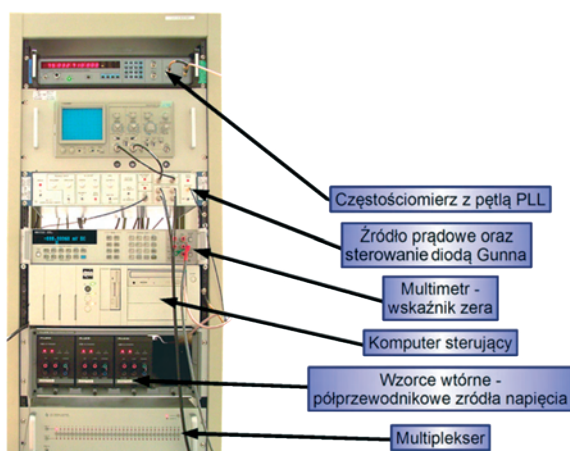
## Stanowisko wzorca napięcia

Wzorzec JVS to skomplikowany układ pomiarowy (rys. 8) [8]. Można w nim wyróżnić kilka części: układ kriogeniczny, obwód mikrofalowy i układ sterowania. Część kriogeniczną stanowi naczynie Dewara, wypełnione skroplonym helem (o temperaturze 4,2 K), w którym zanurzono sondę.



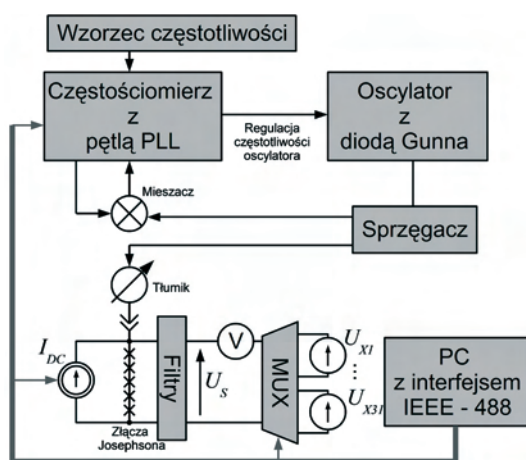
Rys. 8. Układ kriogeniczny i obwód mikrofalowy umieszczony na sondzie

Na końcu sondy znajduje się matryca złączy Josephsona. Do matrycy doprowadzona jest, przy pomocy falowodu, fala elektromagnetyczna o częstotliwości ok. 75 GHz. Na szczycie sondy znajduje się oscylator wykorzystujący diodę Gunna. Sygnał z oscylatora dociera, poprzez izolator, do sprzęgacza. Sprzęgacz rozdziela sygnał mikrofalowy. Część sygnału trafia do mieszacza, a druga część, poprzez tłumik regulujący moc fali elektromagnetycznej, dociera falowodem do matrycy JJ. Cały układ jest sterowany elektronicznie (rys. 9).



Rys. 9. Układ sterowania systemem i przekazywania jednostki

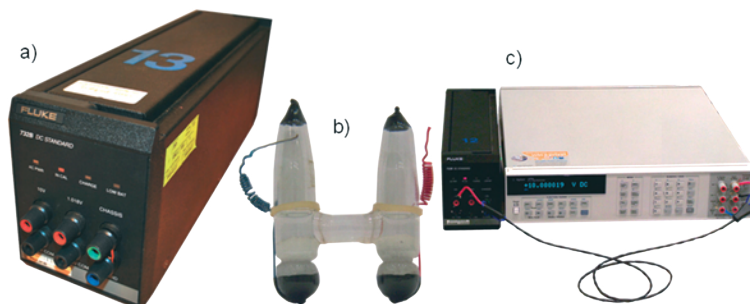
Mieszacz połączony jest z częstościomierzem mikrofalowym realizującym pętlę PLL (rys 10). W wyniku mieszania sygnału generowanego przez oscylator mikrofalowy z heterodyną licznika, powstaje między innymi składowa będąca różnicą tych dwóch sygnałów. Składowa ta ma niższą częstotliwość niż sygnał z oscylatora mikrofalowego. Częstościomierz jest synchronizowany z zewnętrznym wzorcem częstotliwości o wartości 10 MHz. Pozwala to na pomiar częstotliwości z niepewnością względną mniejszą niż  $10^{-10}$ .



Rys. 10. Schemat stanowiska wzorca napięcia

Dodatkowo, po każdym pomiarze częstotliwości, częstościomierz koryguje napięcie zasilające diodę Gunna, co zapewnia stabilizację częstotliwości fali elektromagnetycznej generowanej przez oscylator.

Dzięki dokładnemu wyznaczeniu oraz stabilizacji częstotliwości fali elektromagnetycznej oświetlającej matrycę JJ, a także w wyniku kwantowego charakteru zjawiska, niepewność względna odtwarzanego napięcia jest rzędu  $10^{-9}$ .



Rys. 11. Wzorce napięcia a) półprzewodnikowe źródło napięcia (dioda Zenera), b) ogniwo Westona, c) woltomierz referencyjny

## Przekazywanie jednostki napięcia

Z wysokiej dokładności, jaką uzyskuje się podczas porównania źródła napięcia pokazanego na rys. 11a, ze wzorcem pierwotnym, korzysta wielu odbiorców. Laboratoria wzorcujące utrzymują wzorce odniesienia (rys. 11), ponieważ stosują je do wzorcowania przyrządów przetwarzających różne wielkości fizyczne na napięcie. Przykładem jest wspomniana już wcześniej termopara. Pomiar temperatury następuje poprzez pomiar różnicy potencjałów pomiędzy złączem pomiarowym i odniesienia. Ponadto wzorce napięcia służą do kalibracji liczników energii elektrycznej, multimetrów, kalibratorów napięcia. Wzorce odniesienia pomagają wyznaczyć wartość poprawną źródeł napięć referencyjnych w przetwornikach analogowo-cyfrowych i cyfrowo-analogowych, które występują licznie w nowoczesnych systemach pomiarowych. Wzorcowe źródła napięcia znajdują także zastosowanie w laboratoriach wojskowych, gdzie są wykorzystywane do kalibracji sprzętu elektronicznego będącego częścią uzbrojenia.

## Wzorzec rezystancji

Realizację wzorca pierwotnego rezystancji uzyskuje się wykorzystując kwantowe zjawisko Halla. Systemy oparte na kwantowym efekcie Halla (QHE – Quantum Hall Effect) [9] odtwarzają rezystancję o ściśle określonej wartości, z niepewnością tak małą, że można ją pominąć w stosunku do innych składników niepewności układu przenoszącego jednostkę. Układy odtwarzania jednostki rezystancji wykorzystujące kwantowy efekt Halla nie wymagają wzorcowania, lecz podlegają jedynie kontroli podczas międzynarodowych porównań.

GUM został wyposażony w system realizacji jednostki rezystancji ze zjawiska kwantowego QHR (Quantum Hall Resistance) w 2005 r. Do chwili obecnej Laboratorium Wzorców Wielkości Elektrycznych prowadzi prace mające na celu ustanowienie QHR państwowym wzorcem oporu elektrycznego, gdyż obecnie jest nim wzorzec materialny – grupa sześciu oporników o wartości nominalnej  $1 \Omega$ . Obecnie w Laboratorium Wzorców Elektrycznych GUM trwają prace przygotowawcze do koordynowanych przez BIPM porównań międzynarodowych BIPM.EM-K13.a i BIPM.EM-K13.b (porównania rezystancji o wartości nominal-

nej 1  $\Omega$  i 10 k $\Omega$ ) [10]. GUM będzie brał w nich udział pod koniec 2009 r. Udział w tych komparacjach ma na celu potwierdzenie kompetencji laboratorium oraz najlepszych możliwości pomiarowych (CMC), co pozwoli już w 2010 roku ustanowić QHR wzorcem państwowym.



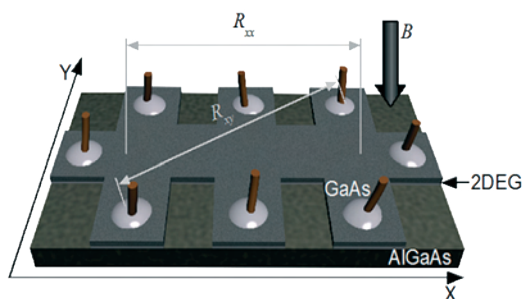
Rys. 12. Pracownia rezystancji

## Kwantowy efekt Halla

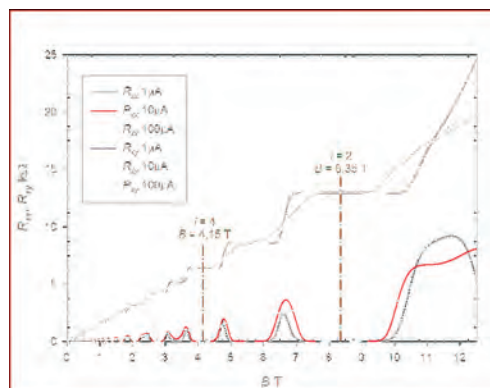
Dotychczasowe wzorce rezystancji były wzorcami materialnymi wymagającymi zapewnienia stałych warunków środowiskowych i monitorowania stabilności. Badania półprzewodników w niskich temperaturach i polach magnetycznych doprowadziły do odkrycia kwantowego efektu Halla. Stosunkowo niedawno odkryte zjawisko kwantowego efektu Halla szybko znalazło zastosowanie w metrologii elektrycznej.

Odkrywcą tego zjawiska jest noblista – Klaus von Klitzing. Przeprowadzając doświadczenia w latach 1972 – 1980 udowodnił on kwantowanie rezystancji pod wpływem pola magnetycznego [9]. W roku 1985 von Klitzing otrzymał Nagrodę Nobla za odkrycie kwantowego efektu Halla.

Dzięki QHE 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 z doskonałą dokładnością [10].



Rys. 13. Struktura odtwarzająca rezystancję z QHE



Rys. 14. Charakterystyka próbki QHR



Całkowity kwantowy efekt Halla występuje w przypowierzchniowym obszarze złącz półprzewodnik-półprzewodnik i półprzewodnik-izolator, w temperaturze kriogenicznej (poniżej 1 K) oraz w obecności silnego pola magnetycznego. Wówczas rezystancja próbki w kierunku prostopadłym do przepływu prądu  $I_x$  przyjmuje skwantowane wartości

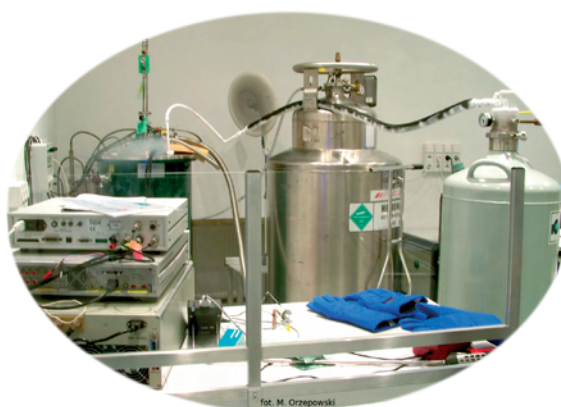
$$R_{xy} = \frac{h}{qei} = \pm \frac{h}{e^2i} = \pm \frac{R_K}{i} \approx \pm \frac{25812,807}{i} \Omega, \quad (4)$$

gdzie  $h$  – stała Plancka,  $e$  – ładunek elektronu,  $q = \pm e$  dla dziur lub elektronów,  $i$  – liczba całkowita,  $R_K = h/e^2$  – stała von Klitzinga.

Zjawisko to spowodowane jest powstawaniem w temperaturze kriogenicznej dwuwymiarowego gazu nośników ładunku elektrycznego [11], w warstwie międzypowierzchniowej, który ma możliwość ruchu jedynie w płaszczyźnie ograniczonej dwoma półprzewodnikami. Właśnie to ograniczenie powoduje, że w przypadku, gdy rezystancja w kierunku X maleje do zera pod wpływem pola magnetycznego, rezystancja w kierunku Y przyjmuje skwantowane wartości (rys. 14).

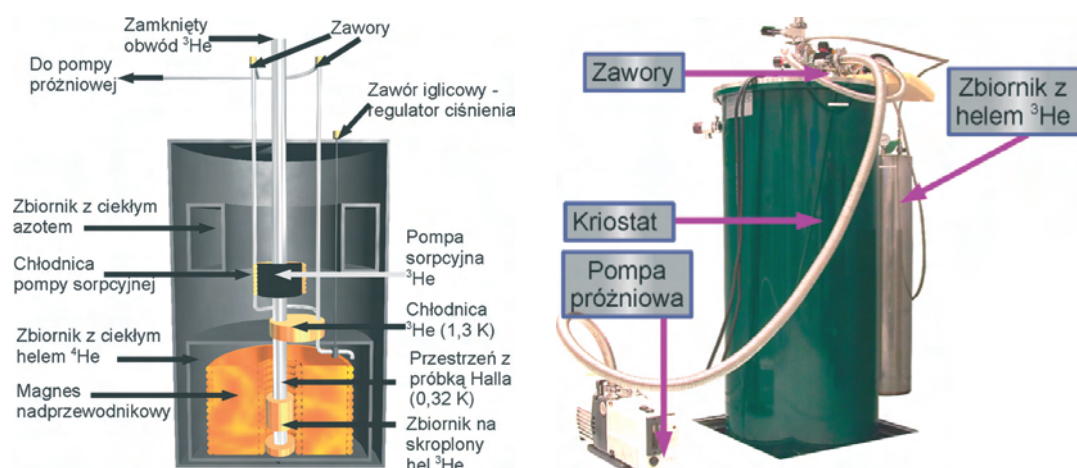
## Stanowisko wzorca rezystancji

Heterostruktura odtwarzająca jednostkę rezystancji z kwantowego zjawiska Halla (próbka Halla), umieszczona jest w kriostacie wypełnionym skroplonym heliem  $^4\text{He}$ . Temperatura helu w stanie ciekłym to 4,2 K, zatem jest ona zbyt wysoka, aby uzyskać stabilny QHE. W związku z tym układ wzorca (rys. 16) zawiera system do obniżenia temperatury nawet do 0,3 K. Uzyskanie tak niskiej temperatury umożliwia zastosowanie izotopu helu  $^3\text{He}$ . Substancja ta charakteryzuje się temperaturą skraplania 1,5 K. Skraplanie odbywa się za pomocą chłodnicy, która osiąga temperaturę 1,3 K. Przez chłodnicę przepompowywane są pary helu  $^4\text{He}$ , którego ciśnienie obniżono przy pomocy pompy próżniowej do ok. 10 mbar.



Rys. 15. Stanowisko wzorca rezystancji

Po skropleniu helu  $^3\text{He}$  znajduje się w zbiorniku na samym dnie sondy umieszczonej w kriostacie. Kolejnym etapem jest schłodzenie próbki Halla za pomocą par helu  $^3\text{He}$ , których ciśnienie także jest obniżane, przy czym nie korzysta się z mechanicznych pomp próżniowych, ale z pompy sorpcyjnej wykonanej z węgla aktywowanego. W temperaturze cie-



Rys. 16. Układ kriogeniczny do uzyskania kwantowego efektu Halla

kiego helu następuje adsorpcja molekuł  $^3\text{He}$ . Chłodzenie pompy sorpcyjnej realizowane jest poprzez odpompowywanie par helu  $^4\text{He}$ , przy pomocy pompy próżniowej. W ten sposób próbka osiąga temperaturę obniżoną nawet do 0,3 K.



Rys. 17. Temperatury w układzie kriogenicznym (ekran kontrolera temperatury LakeShore 340):  
A – temp. pompy sorpcyjnej, B – temp. próbki,  
C – temp. chłodnicy

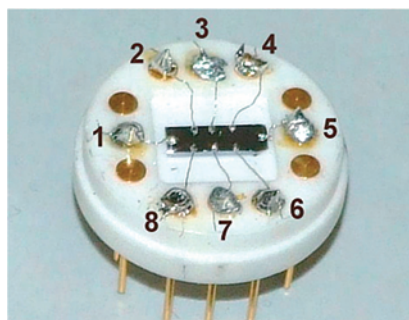


Rys. 18. Zasilacz elektromagnesu nadprzewodnikowego

Kolejnym warunkiem, koniecznym do uzyskania wzorcowej rezystancji na zaciskach struktury półprzewodnikowej, jest obecność silnego pola magnetycznego. Aby osiągnąć plateau rezystancji o wartości  $R_K/2$ , konieczne jest zastosowanie pola magnetycznego o indukcji ok. ośmiu tesli. Uzyskanie tak silnego pola magnetycznego jest możliwe przy użyciu elektromagnesu nadprzewodnikowego. Na stanowisku pomiarowym w GUM, w temperaturze skroplonego helu (4,2 K), przez elektromagnes może przepływać prąd stały o natężeniu do 100 A, który powoduje powstanie pola magnetycznego o indukcji do 15 T.

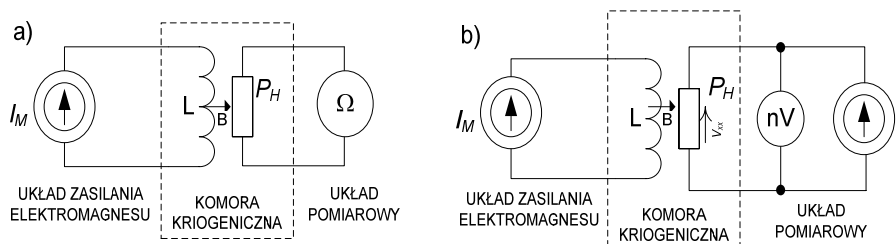
## Badanie próbki Halla

W ramach badań właściwości próbki Halla stanowiącej kwantowy wzorzec rezystancji wykonano pomiary charakterystyk rezystancji próbki w zależności od zewnętrznego pola magnetycznego oraz charakterystyki prądowo-napięciowej. Rysunek 19 przedstawia próbkę Halla umieszczoną na specjalnej podstawie montażowej, z naniesionymi kontaktami elektrycznymi.



Rys.19. Próbką Halla z doprowadzeniami prądowymi

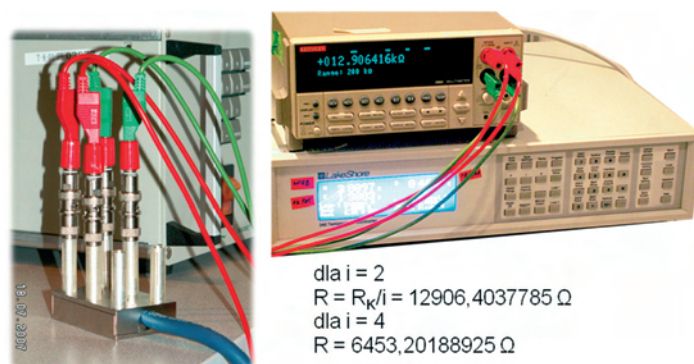
Przewody prądowe doprowadzone są do kontaktów 1 i 5. Napięcie  $V_{xy}$  mierzone jest pomiędzy kontaktami 3 i 7, natomiast spadek napięcia wzdłuż próbki, określający rezystancję  $V_{xx}$ , mierzony jest między kontaktami 2 i 4. Rezystancja kontaktów 6 i 8 wynosi  $20 \Omega$ , a pozostałych poniżej  $2 \Omega$ . Do doprowadzeń podstawy mocującej próbki przyłączone są przewody wyprowadzające do złącza, znajdującego się na zewnątrz kriostatu, do którego można podłączyć dowolne urządzenie pomiarowe. Pomiary charakterystyki  $R = f(B)$ , dla obu kierunków występowania rezystancji, wykonywane są za pomocą układu pomiarowego, przedstawionego na rys. 20.



Rys. 20. Układ do pomiaru charakterystyki (a)  $R = f(B)$  próbki Halla, (b) charakterystyki  $V_{xx} = f(I)$ ;  $P_H$  – próbka Halla

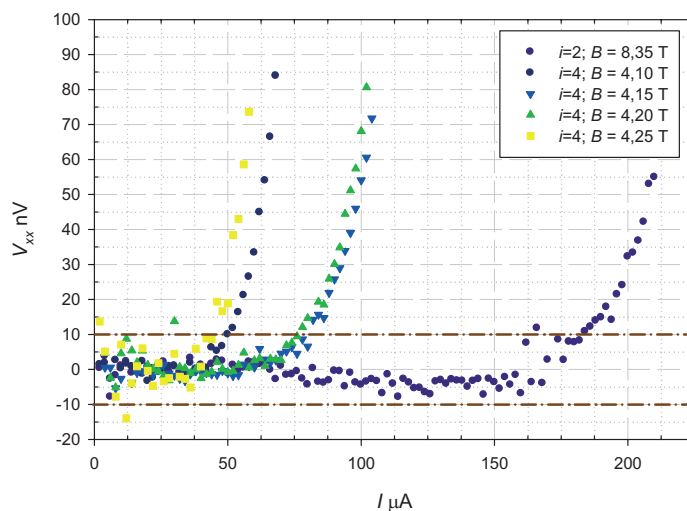
Na schemacie pomiarowym można wyróżnić układ zasilający elektromagnesu nadprzewodnikowego, komorę kriogeniczną z próbką Halla oraz układ pomiaru rezystancji. Pomiar rezystancji w obu kierunkach próbki przeprowadza się za pomocą multimetru cyfrowego przy  $T = 0,35 \text{ K}$ . Wyniki pomiarów ilustruje wykres na rys. 14. Na wykresie wyraźnie widoczne są charakterystyki rezystancji  $R_{xy}$  oraz  $R_{xx}$  próbki, dla różnych wartości prądów pomiarowych. Najbardziej interesująca z punktu widzenia metrologicznego jest krzywa rezystancji Halla  $R_{xy}$ , której „stopnie rezystancyjne” (plateau) są wykorzystywane jako wzorzec rezystancji. Stopnie te świadczą o występowaniu QHE w próbce. Szczególnie interesujące są wykorzystywane w praktyce poziomy plateau  $i = 2$  oraz  $i = 4$ , dla których wartości rezystancji wynoszą  $R_{H(i=2)} = 12\,906,4035 \Omega$  oraz  $R_{H(i=4)} = 6\,453,20175 \Omega$ . Wartości te są określone odpowiednio przy indukcji magnetycznej  $B_{(i=2)} = 8,35 \text{ T}$  i  $B_{(i=4)} = 4,15 \text{ T}$ , co wynika ze wskazań producenta próbki.

Z wyliczeń wynika, że środki plateau wypadają przy indukcjach magnetycznych  $B_{(i=2)} = 8,44 \text{ T}$  i  $B_{(i=4)} = 4,18 \text{ T}$ . Oczywiście, takie przesunięcie indukcji magnetycznej, przy której wyznaczana jest rezystancja, nie ma znaczenia dla dokładności otrzymywanych wyników. Wartość pola magnetycznego podczas odtwarzania jednostki rezystancji



Rys. 21. Pomiary charakterystyki QHR – rezystancja dla rezystancji  $R_K/2$

powinna być ustalona tak, aby znajdowała się w pobliżu środka plateau kwantyzacji rezystancji. Istnieje ryzyko dobrania pola magnetycznego w punkcie początku przejścia na następnego plateau, co może doprowadzić do zafałszowania wyników pomiarowych. Szczególnie istotne jest to podczas pomiarów przy wysokim prądzie pomiarowym, gdzie szerokość plateau wyraźnie się zmniejsza ze względu na wyższą koncentrację nośników [12]. Wskazane jest również sprawdzenie, po pewnym czasie, czy próbka wskutek naprężeń termicznych oraz procesów starzeniowych nie zmieniła swoich parametrów i czy plateau nie uległy przesunięciu w funkcji indukcji magnetycznej. W pomiarach rezystancji wykorzystywane są plateau parzyste ze względu na fakt, że na pozostałych stopniach kwantyzacji rezystancja  $R_{xx}$  pozostaje niezerowa, a co za tym idzie, mogłaby wpływać na wartość mierzonej rezystancji  $R_{xy}$ .



Rys. 22. Charakterystyka  $V_{xx} = f(I)$  próbki Halla

Wykonano również pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych próbki w celu ustalenia optymalnego, z punktu widzenia pomiarów, doboru indukcji magnetycznej oraz maksymalnych prądów pomiarowych (rys. 22). W tym celu zbadano spadek  $R_{xx}$ , a co za tym idzie, punkt zapełnienia stanów zlokalizowanych i początek obsadzania kolejnego stanu zdelokalizowanego przez nośniki. Do określania prądów pomiarowych przyjęto kryterium

$V_{xx} < 10$  nV. Wyraźnie widoczne jest, że dla plateau  $i = 2$  dopuszczalny prąd pomiarowy przekracza  $150 \mu\text{A}$ , przy zalecanej wartości  $B = 8,35$  T. Dla plateau  $i = 4$  wykonano pomiary przy różnych indukcjach magnetycznych. Analiza uzyskanych charakterystyk pokazuje, że najwyższy prąd pomiarowy można stosować przy  $B$  z zakresu:  $4,15 \div 4,20$  T, co jest zgodne z wartościami uzyskanymi podczas badań przebiegów  $R = f(B)$ .

## Przekazywanie jednostki rezystancji

W chwili obecnej wzorzec QHR znajdujący się w GUM pozwala na odtworzenie jednostki rezystancji z kwantowego efektu Halla z niepewnością względną mniejszą niż  $10^{-9}$ . Ze względu na nietypowe wartości rezystancji ( $12,90$  k $\Omega$  i  $6,45$  k $\Omega$ ) oraz stosunkowo mały prąd pomiarowy, który nie powinien przekraczać  $100 \mu\text{A}$ , standardowe przyrządy do przekazywania jednostki rezystancji, takie jak mostki prądu stałego, przemiennego i komparatory rezystancji, nie pozwalają na wykorzystanie zalety układu QHR, jaką jest najmniejsza ze wszystkich wzorców rezystancji niepewność odtwarzania jednostki. Niestety w przypadku standardowych przyrządów pomiarowych, przystosowanych do pracy z opornikami wzorcowymi, przy pomiarze wykorzystującym wzorzec kwantowy pojawiają się rozrzuty pomiarów, degradujące jakość transferu jednostki do poziomu niepewności względnej rzędu  $10^{-7} \div 10^{-6}$ . Na osiągnięcie znacznie lepszych rezultatów pozwalają specjalne konstrukcje prądowych komparatorów rezystancji, pozwalające na przeniesienie jednostki bezpośrednio od wzorca kwantowego z niepewnością względną ok.  $2 \cdot 10^{-8}$ . Ponadto istnieje także zmodyfikowana wersja prądowego komparatora rezystancji, wykorzystująca kwantowe zjawiska zachodzące w bardzo niskich temperaturach. Kriogeniczny komparator prądowy CCC (Cryogenic Current Comparator) [13], wykorzystujący zjawisko nadprzewodnictwa (efekt Meissnera – Ochsensfelda) oraz czuły detektor zmian pola magnetycznego – interferometr SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) [14], pozwalają na przekazywanie jednostki z niepewnością względną rzędu  $10^{-9}$ , bezpośrednio z kwantowego wzorca rezystancji.

Główny Urząd Miar wraz z systemem wzorca QHR posiada stanowisko z komparatorem CCC. To właśnie za jego pomocą następuje przekazanie jednostki bezpośrednio z kwantowego efektu Halla na rezystory o wartości nominalnej  $100 \Omega$ . Następnie od wzorcowych rezystorów stuomowych jednostka jest przekazywana na cały typoszereg rezystorów (od  $1 \Omega$  do  $10$  k $\Omega$ ) z niepewnością względną rzędu  $10^{-8}$ , przy zastosowaniu CCC. Z kolei, aby pokryć cały zakres pomiarowy (od  $0,1$  m $\Omega$  do  $1$  T $\Omega$ ), Laboratorium Wzorców Wielkości Elektrycznych, stosuje prądowy komparator rezystancji do  $100\,000$  k $\Omega$  oraz wysokoomowy mostek rezystancyjny pozwalający przekazać jednostkę do  $1$  T $\Omega$ .

## Podsumowanie

Kwantowe wzorce napięcia elektrycznego i rezystancji, utrzymywane w Laboratorium Wzorców Wielkości Elektrycznych Zakładu Elektrycznego GUM wykorzystują najlepszą na świecie realizację tych jednostek. Realizacja jednostek napięcia i rezystancji ze zjawisk kwantowych pozwala na zachowanie spójności pomiarowej z międzynarodowym systemem miar. Kwantowy wzorzec napięcia elektrycznego stanowi odniesienie dla wszystkich pomiarów napięcia wykonywanych w kraju. Wzorzec rezystancji, oparty o kwanto-

we zjawisko Halla, zostanie ustanowiony wzorcem państwowym po przeprowadzeniu porównań, które odbędą się pod koniec 2009 r. Utrzymywanie tych wzorców ma duże znaczenie dla gospodarki, przemysłu oraz obronności i bezpieczeństwa państwa.

## Literatura

- [1] L. Michalski, K. Eckersdorf, J. Kucharski: *Termometria, przyrządy i metody*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. Łódź 1998.
- [2] D. Domańska-Mysłiwiec, M. Mosiądz, L. Snopek: *Od kwantowego efektu Halla do rezystora wzorcowego – system przekazywania jednostki miary*. *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 53, 9 bis (2007).
- [3] B. D. Josephson: *Possible new effects in superconductive tunneling*. *Physics Letters*, 1 (1962), 251.
- [4] E. Dudek, M. Mosiądz: *Wzorce jednostek miar rezystancji i napięcia elektrycznego, a podstawowe stałe fizyczne*. *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 53, 9 bis (2007).
- [5] A. Barone, G. Paterno: *Physics and Applications of Josephson Effect*. Willey & Sons, 1982.
- [6] M. Cyrot, D. Padun: *Wstęp do nadprzewodnictwa. Nadprzewodniki wysokotemperaturowe*. PWN, Warszawa 1996.
- [7] <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>.
- [8] C. A. Hamilton, C. Burroughs, K. Chieh: *Operation of NIST Josephson Array Voltage Standards*. *Journal of Research of the NIST*, vol. 95, nr 3, (1990) 219.
- [9] K. von Klitzing, G. Dorda, M. Pepper: *New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance*. *Phys. Rev. Lett.*, vol. 45 (1980), 494 – 497.
- [10] <http://kcdb.bipm.org>
- [11] K. I. Wysokiński: *Quantum Hall Effect: the fundamentals*. *Metrology and Measurement Systems*, vol. 13 (2006), nr 2, 113 – 124.
- [12] K. von Klitzing: *25 Years of Quantum Hall Effect (QHE) – A Personal View on the Discovery, Physics and Applications of this Quantum Effect*, *Seminaire Poincare*, Paris, 2 (2004), 1 – 16.
- [13] M. Orzepowski: *Wykorzystanie zjawisk kwantowych w pomiarach napięcia elektrycznego i rezystancji*. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 5 (2008).
- [14] M. Mosiądz, M. Orzepowski: *Zastosowanie komparatora kriogenicznego do przekazywania jednostki miary rezystancji*. *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 53, 9 bis (2007).