

NIEPEWNOŚĆ W METROLOGII KWANTOWEJ WIELKOŚCI ELEKTRYCZNYCH

Edyta Dudek, Marcin Orzepowski
Główny Urząd Miar

1. Wstęp

Realizacja jednostek wielkości fizycznych przy pomocy wzorców kwantowych wynika wprost ze stałych fizycznych – niezmiennych wielkości występujących we wzorach opisujących prawa przyrody. Stałe fizyczne pozwalają na wzajemne odniesienie różnych wielkości fizycznych względem siebie. Potrzeba stosowania stałych wynika z chęci odniesienia do zjawisk niezmiennych. Wiedza uporządkowana w ten sposób pomaga definiować jednostki miar. Wzorce realizujące jednostkę zdefiniowaną przy użyciu stałych fizycznych są najlepszymi reprezentacjami tej jednostki.

2. Stałe kwantowe w definicjach jednostek wielkości elektrycznych

Ważną grupą wielkości fizycznych o stałych wartościach są stałe uniwersalne, które można wyznaczyć jedynie na drodze pomiarów. Należą do nich m.in. stała Plancka – h i ładunek elementarny elektronu – e . Pozwalają one wyznaczyć inne stałe fizyczne. Zastosowanie stałych o fundamentalnym znaczeniu oraz wykorzystanie zasad mechaniki kwantowej jest podstawą obecnego rozumienia zjawisk fizycznych.

Najważniejsze stałe w kwantowej metrologii elektrycznej: stała Josephsona K_J i stała Klitzinga R_K zależą wyłącznie od uniwersalnych stałych: stałej Plancka i ładunku elementarnego elektronu. Stała Plancka h została wprowadzona przez Maxa Plancka w 1900 r., kiedy próbował wyjaśnić obserwowane właściwości promieniowania termicznego ciała doskonale czarnego [1]. Planck zapostulował, że energia nie może być wypromieniowywana w dowolnych ciągłych ilościach, a jedynie w postaci „paczek” (kwantów) o wartości $h\nu$. Uzyskane przez niego eksperymentalne wyniki potwierdziły fundamentalne założenie teorii kwantowej. Fakt ten uczynił wielkość h wielkością realnie istniejącą. Stała Plancka pozwoliła powiązać korpuskularne i falowe właściwości materii.

Po raz pierwszy elementarny ładunek elektryczny e wyznaczył Robert Millikan w 1910. Jego doświadczenie potwierdziło, że ładunek pojedynczego elektronu jest ładunkiem elementarnym, tzn. że wartość bezwzględna każdego ładunku jest całkowitą wielokrotnością pewnego ładunku $q = n \cdot e$, gdzie $n = 1, 2, 3$; q – całkowity ładunek, e – wartość bezwzględna ładunku elektronu.

Zjawisko, odkryte i opisane przez Briana D. Josephsona w 1962 r. [2], zachodzące w strukturze dwóch nadprzewodników oddzielonych cienką warstwą izolacyjną zostało wykorzystane do praktycznej realizacji pierwotnego wzorca jednostki miary

napięcia elektrycznego. W 1987 r. XVIII Generalna Konferencja Miar przyjęła rezolucję, która zaleciła realizację wolta, wykorzystującą wartość stałej Josephsona K_J wyznaczonej eksperymentalnie i stosowanie jej od 1 stycznia 1990 r. Rok później, w 1991 r., Międzynarodowy Komitet Miar (CIPM) ustanowił umowną, dokładną wartość stałej K_{J-90} .

Stała Josephsona K_J określa zależność pomiędzy częstotliwością a napięciem elektrycznym, jakie występują podczas obserwacji kwantowego zjawiska Josephsona. Ma wymiar ilorazu częstotliwości i napięcia elektrycznego

$$K_J = \frac{2e}{h} \quad (1)$$

W 1980 r. K. von Klitzing odkrył występowanie kwantowego efektu Halla [3] w próbkach zawierających dwuwymiarowy gaz elektronowy (2-DEG) [4]. W oparciu o jego eksperymenty ustalono wielkość reprezentującą nowy rodzaj wzorca rezystancji. Podano umowną wartość stałej Klitzinga R_{K-90} . W latach 90-tych Komitet Doradczy ds. Elektryczności (CCE) zalecił odtwarzanie jednostki miary oporu elektrycznego w oparciu o nowy rodzaj wzorców pierwotnych tej jednostki, wykorzystujących kwantowy efekt Halla. Wprowadzenie zaleceń CCE oznaczało dla wszystkich krajowych instytucji metrologicznych (NMI) konieczność zmiany wartości wzorców jednostki miary oporu elektrycznego, odnoszonych do tej pory do tradycyjnego wzorca, stanowiącego grupę oporników wzorcowanych w Międzynarodowym Biurze Miar (BIPM).

Stała von Klitzinga R_K ma wymiar rezystancji i dlatego spotyka się w literaturze określenie rezystancja von Klitzinga. Stała wyraża, przy pomocy ładunku elementarnego i stałej Plancka, rezystancję poprzeczną wynikającą z kwantowego zjawiska Halla

$$R_K = \frac{h}{e^2} \quad (2)$$

Stała struktury subtelnej α to stała fizyczna charakteryzująca siłę oddziaływań elektromagnetycznych, jest to stała bezwymiarowa, którą stanowi kombinacja stałych Plancka, ładunku elementarnego, prędkości światła w próżni oraz przenikalności elektrycznej próżni. Za pomocą stałej struktury subtelnej można wyrazić stałe von Klitzinga i Josephsona

$$K_J^2 = \frac{8\alpha}{\mu_0 c h} \quad (3)$$

$$R_K = \frac{\mu_0 c}{2\alpha} \quad (4)$$

Wartości liczbowe powyższych stałych fizycznych zawiera tab. 1. Niezmiennosc stałych fizycznych oraz możliwość praktycznej realizacji jednostek z wykorzystaniem kwantowych zjawisk fizycznych pozwala na zdefiniowanie szeregu jednostek w odniesieniu do stałych fizycznych.

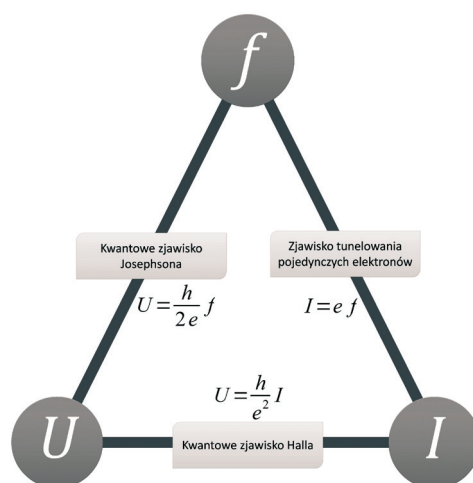
Tab. 1. Wartości stałych fizycznych zgodnych z CODATA

Stała	Wartość stałej
h	$6,626\,068\,96(33) \times 10^{-34} \text{ J s}$
e	$1,602\,176\,487(40) \times 10^{-19} \text{ C}$
α	$7,297\,352\,5376(50) \times 10^{-3}$
K_J	$483\,597,891(12) \times 10^9 \text{ Hz/V}$
R_K	$25\,812,807\,557(18) \Omega$

3. Kwantowe wzorce wielkości elektrycznych

Kwantowy charakter zjawisk fizycznych może być wykorzystany do konstrukcji przyrządów pomiarowych umiejscowionych na szczycie hierarchii wzorców. Dzięki przyjmowaniu przez zjawisko fizyczne wartości ze ściśle określonego szeregu, wykorzystanie zjawisk kwantowych i definicja jednostek w oparciu o stałe fizyczne daje możliwość budowy wzorców pierwotnych. Wzorce takie są najlepszą realizacją danej jednostki, gdyż przeprowadzana jest ona w oparciu o teoretyczną definicję i nie podlegają one wzorcowaniu. Globalną spójność pomiarową zapewnia system porównań międzynarodowych, które organizowane są przez BIPM oraz regionalne organizacje metrologiczne (w Europie – EURAMET). Porównania międzynarodowe pozwalają na potwierdzenie najlepszej możliwości pomiarowej, a zatem najmniejszej niepewności uzyskiwanej przez NMI.

Kwantowe wzorce wielkości elektrycznych odtwarzają jednostki wiążąc ze sobą różne zjawiska fizyczne [4, 5]. To wzajemne powiązanie można zobrazować w po-



Rys. 1. Kwantowy trójkąt metrologiczny dla wielkości elektrycznych

stacji kwantowego trójkąta metrologicznego (rys. 1). Wzorzec napięcia elektrycznego stałego oparty na kwantowym zjawisku Josephsona odtwarza jednostkę napięcia w odniesieniu do wzorca częstotliwości.

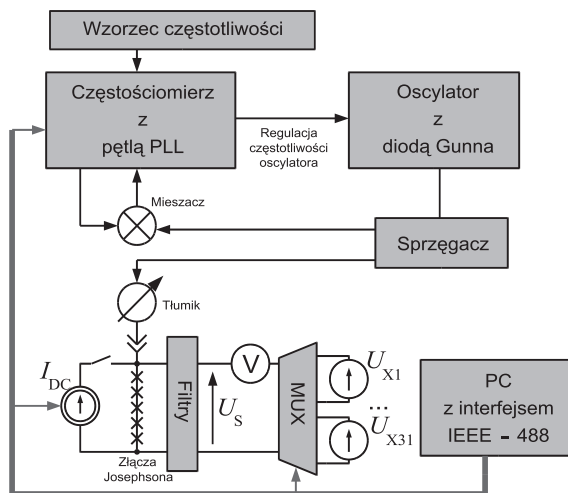
Półprzewodnikowa struktura, umożliwiająca urzeczywistnienie kwantowego efektu Halla, odtwarza wzorcową wartość rezystancji. Zatem zgodnie z prawem Ohma stanowi powiązanie pomiędzy wielkościami napięcia i prądu elektrycznego.

Trwają także prace nad tranzystorem SET – urządzeniem pozwalającym na powiązanie prądu i częstotliwości. Niestety niepewność wartości prądu oraz zakres jego odtwarzania, jaką uzyskuje się ze źródła opartego na takim tranzystorze, nie jest na tyle niska, aby uznać je za wzorzec pierwotny.

3.1. Wzorzec napięcia elektrycznego stałego

Jednostkę napięcia stałego odtwarza system JVS (Josephson Voltage Standard) wykorzystując właściwości kwantowego zjawiska Josephsona. Efekt ten zachodzi w temperaturze ciekłego helu (4,2 K) [6, 7]. Zanurzone tam matryce złącz Josephsona – dwóch elektrod nadprzewodnikowych oddzielonych cienką warstwą dielektryka – poddawane są działaniu fali elektromagnetycznej o wielkiej częstotliwości. Częstotliwość ta jest mierzona i stabilizowana pętlą PLL w odniesieniu do sygnału wzorcowego 10 MHz. Wzorcowa częstotliwość odtwarzana jest przez zegar atomowy znajdujący się w Laboratorium Czasu i Częstotliwości GUM. Pozwala to na pomiar częstotliwości mikrofal promieniujących na matrycę złącz Josephsona z niepewnością względną mniejszą niż 10^{-9} .

Poddanie szeregu złącz Josephsona działaniu wielkoczęstotliwościowej fali elektromagnetycznej [8] powoduje przyjmowanie przez napięcie skwantowanych poziomów pod wpływem przepuszczenia przez złącze prądu sterującego I_{DC} .



Rys. 2. Schemat stanowiska wzorca napięcia

Odtwarzane napięcie przyjmuje wartości określone wzorem

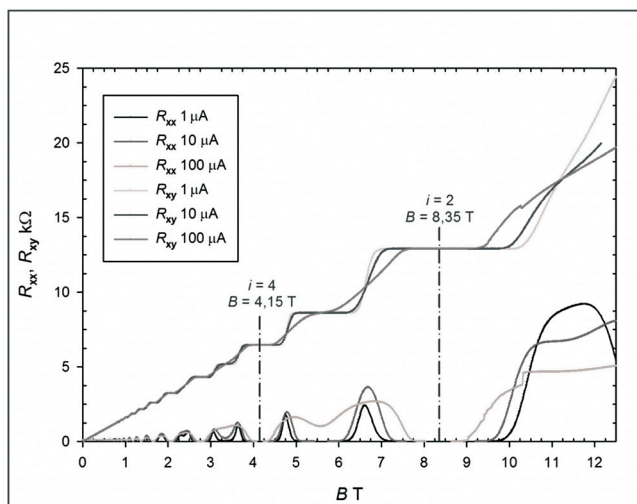
$$U = n \frac{f}{K_J} \quad (5)$$

gdzie $n = 0, 1, 2, \dots$ – numer stopnia, czyli skwantowanego poziomu napięcia, f – częstotliwość fali elektromagnetycznej, generowanej przez oscylator z diodą Gunna.

Napięcie U_s , generowane przez matrycę złącz, stosowane jest do wzorcowania półprzewodnikowych, wzorcowych źródeł napięcia stałego. Wykorzystują one właściwości stabilizujące diod Zenera do odtwarzania napięcia elektrycznego. Półprzewodnikowe wzorce wtórne $U_{X1, \dots, 31}$ porównywane są z napięciem wzorcowym przy pomocy czułego woltomierza cyfrowego V. W pierwszej fazie różnica napięć pomiędzy U_s i U_{X_i} niwelowana jest – poprzez wybór stopnia napięciowego – tak aby nie przekraczała 10 mV. Jest to konieczne aby wpływ rezystancji woltomierza (jego liniowości i dokładności) na niepewność pomiaru był znikomy. Mierzony wzorzec wtórny wybierany jest za pomocą multipleksera MUX. Pomiar przeprowadzany jest w dwóch polaryzacjach źródła, w celu wyeliminowania wpływu termicznych sił elektromotorycznych na wynik i niepewność pomiaru.

3.2. Wzorzec rezystancji

Odkryte przez Klausa von Klitzinga kwantowe zjawisko Halla znalazło zastosowanie jako pierwotny wzorzec rezystancji. Kwantowy efekt Halla (QHE) zachodzi w temperaturze poniżej 1 K w półprzewodnikowych heterostrukturach GaAs/AlGaAs [9]. W tych warunkach obserwuje się powstawanie charakterystycznych stopni (plateau) rezystancji próbki R_{xx} , będącej stosunkiem napięcia poprzecz-



Rys. 3. Charakterystyka półprzewodnikowej struktury realizującej QHE

nego próbki U_{xx} do prądu wzdłużnego (rys. 3), podczas gdy rezystancja próbki R_{xy} , którą realizuje stosunek napięcia wzdłużnego U_{xy} do prądu wzdłużnego, zanika.

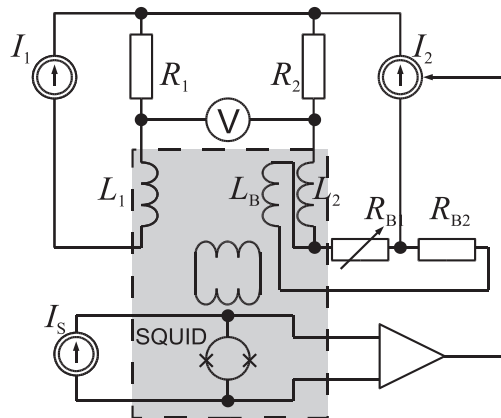
Okazuje się, że wartość rezystancji odtwarzanej przez taką strukturę półprzewodnikową przyjmuje, pod wpływem zewnętrznego, stałego pola magnetycznego o indukcji B , skwantowane, stałe wartości, będące podwielokrotnością stałej von Klitzinga R_K ($i = 1, 2, 3 \dots$).

$$R_{xy} = \frac{R_K}{i} \quad (6)$$

W zastosowaniach metrologicznych najczęściej wykorzystywane są drugie i czwarte plateau. Mają one wystarczającą szerokość, aby przy zastosowaniu silnego elektromagnesu nadprzewodnikowego, wykorzystać je jako wzorcowe wartości rezystancji. Ponadto wartości oporu elektrycznego odtwarzane przez te plateau należą do średnich wartości rezystancji, wynoszących blisko 6,5 k Ω oraz 13 k Ω , przez co można efektywnie z nimi porównywać najczęściej stosowane rezystory wzorcowe [10].

W przypadku systemu do odtwarzania jednostki rezystancji, zainstalowanego w GUM, wykorzystywane jest także drugie i czwarte plateau. Osiągane jest ono z zastosowaniem elektromagnesu, wywołującego pole magnetyczne o indukcji do 15 T w przestrzeni zajmowanej przez półprzewodnikową próbkę Halla. Pomiary są wykonywane przy polach magnetycznych, których wartość indukcji oscyluje w okolicach 4 T ($i = 4$) oraz 8 T ($i = 2$). Przed każdym uruchomieniem wzorca sprawdzana jest jego charakterystyka i jako punkt pracy obierany jest środek poziomej stałej rezystancji. Temperatura w przestrzeni zajmowanej przez heterostrukturę jest mniejsza niż 1 K, przyjmuje wartości pomiędzy 0,3 K i 0,6 K.

Rezystancja von Klitzinga, w odróżnieniu od napięcia na matrycy złącz Josephsona, zdefiniowana jest wyłącznie jako kombinacja stałych fizycznych. Z tego względu szacuje się, iż rezystancja może być odtwarzana z niepewnością mniejszą niż



Rys. 4. Schemat kriogenicznego komparatora prądowego

w przypadku napięcia elektrycznego, którego niepewność uzależniona jest od stabilności częstotliwości oscylatora oraz niepewności jej pomiaru.

Przekazywanie jednostki odtwarzanej z kwantowego zjawiska Halla na wzorce wtórne – rezystory wzorcowe wykonuje się przy pomocy kriogenicznego komparatora prądowego (CCC) lub stałoprądowego komparatora rezystancji (DCC). Najmniejsze niepewności uzyskiwane są poprzez porównanie rezystora wzorcowego z wzorcem kwantowym przy użyciu CCC [11].

Kriogeniczny komparator prądowy jest odmianą prądowego komparatora rezystancji, który pozwala wyznaczyć stosunek rezystorów z niepewnością względną rzędu 10^{-9} . Jest to możliwe dzięki wykorzystaniu nadprzewodnikowych uzwojeń mostka, właściwości ekranujących nadprzewodników czyli efektu Meissnera-Ochsenfelda oraz interferometru SQUID jako bardzo czułego detektora zmian wypadkowego natężenia pola magnetycznego, wytwarzanego przez prądy płynące w uzwojeniach mostka [12].

W momencie zmiany stosunku prądów I_1/I_2 zmienia się wypadkowego strumienia magnetycznego wytwarzanego przez uzwojenia komparatora. Zmiana taka może być wywołana niestabilnością źródeł prądowych. W związku z tym następuje zmiana napięcia na czujniku SQUID. Sygnał z interferometru SQUID umożliwia skorygowanie wartości prądu generowanego przez źródło I_2 w taki sposób, aby zniwelować zmianę stosunku prądów I_1/I_2 . Działanie układu przypomina pracę układu PLL, z tego powodu zwany jest on pętlą FLL (Flux Locked Loop). W ten sposób wyeliminowano potrzebę wzorcowania źródeł prądowych oraz poprawiono dokładność, gdyż nawet znaczna niestabilność prądów zasilających ramiona komparatora nie powoduje zmiany równowagi mostka określonej równaniem

$$I_1 N_1 = I_2 N_2 \quad (7)$$

gdzie N_1 , N_2 ilość zwojów w cewkach nadprzewodnikowych L_1 , L_2 . W przypadku gdy stosunek rzeczywistych wartości rezystorów odbiega od wartości nominalnego stosunku $N_1:N_2$ na tyle, że pętla FLL nie jest w stanie stabilizować stosunku prądów płynących przez ramiona mostka, wykorzystywane jest dodatkowe uzwojenie zasilane częścią prądu I_2 mostka L_B , kompensujące zbyt dużą różnicę rzeczywistego i nominalnego stosunku rezystorów.

4. Niepewność pomiaru

4.1. Szacowanie niepewności pomiaru na stanowisku wzorca napięcia

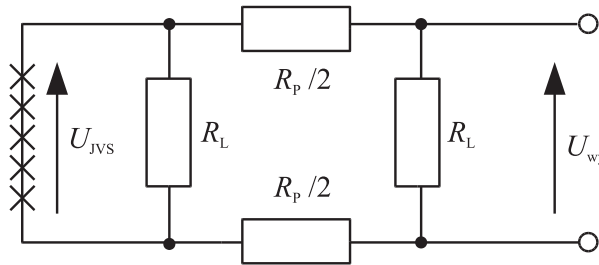
Na niepewność przeniesienia i odtworzenia jednostki napięcia elektrycznego stałego ma wpływ kilka czynników. Źródła niepewności uzależnionej od napięcia mierzonego U_x to częstotliwość sygnału mikrofalowego oraz upływność. Błąd graniczny detektora zera, prąd polaryzujący złącze, nieliniowość detektora, napięcia termoelektryczne, szum, zakłócenia elektromagnetyczne oraz nachylenie stopni napięciowych złącza Josephsona stanowią pozostałe źródła niepewności, które są niezależne od napięcia [13].

Niepewność spowodowaną częstotliwością mikrofal działających na złącza Josephsona wynika z trzech czynników. Pierwszym z nich jest niepewność sygnału wzorcowego o częstotliwości 10 MHz. Sygnał ten, generowany przez zegar atomowy, przesyłany jest do laboratorium za pośrednictwem linii koncentrycznej. Dzięki zastosowaniu wzmacniacza dystrybucyjnego, częstotliwość przesłanego sygnału odniesienia zachowana jest z niepewnością względną rzędu 10^{-12} . Kolejny czynnik to niepewność licznika częstotliwości, dokonującego pomiaru częstotliwości fali elektromagnetycznej, generowanej przez oscylator mikrofalowy, wykorzystujący diodę Gunna. Ten składnik niepewności, dla fali elektromagnetycznej o częstotliwości $f = 75$ GHz, wynosi 20 Hz. Generator mikrofalowy stanowi część układu PLL, syntezyującego sygnał wielkiej częstotliwości. Niepewność związana z zakresem trzymywania pętli PLL, czyli stabilnością częstotliwości fali elektromagnetycznej podczas odtwarzania jednostki, zawiera się w zakresie od 1 Hz do 1 kHz. Zmiany częstotliwości Δf są istotnym składnikiem niepewności pomiaru. Przyjmuje się dla niego równomierny rozkład prawdopodobieństwa, a niepewność standardowa $u(U_p)$ napięcia pochodząca od częstotliwości wyrażana jest wzorem

$$u(U_f) = U_x \frac{\Delta f}{f\sqrt{3}} \quad (8)$$

Typowo składnik ten wnosi do niepewności pomiaru udział 2 nV, przy pomiarze półprzewodnikowych źródeł napięcia stałego o wartości nominalnej 10 V.

Z powodu występowania upływności R_L , bocznikującej źródło badane i matrycę złącz Josephsona na rezystancji R_p modelującej opór przewodów pomiarowych, może pojawić się spadek napięcia.



Rys. 5. Powstawanie błędu spowodowanego upływnością

Zatem napięcie U_{wy} , z którym w rzeczywistości porównane jest badane źródło napięcia, obarczone będzie błędem systematycznym. Można wyznaczyć poprawkę ΔU związaną z upływnością

$$\Delta U = U_x \frac{R_p}{R_L} \quad (9)$$

Wyznaczenie rezystancji R_L wykonywane jest poprzez pomiar spadku napięcia na rezystorze o wartości 1 M Ω , włączanego pomiędzy przewody wychodzące z son-

dy kriogenicznej a uziemienie systemu. Niepewność związaną z wprowadzeniem poprawki oblicza się według wzoru

$$u(U_{R_L/R_p}) = U_{wy} \frac{R_p}{2R_L\sqrt{3}} \quad (10)$$

Wartość tej składowej niepewności wynosi ok. 5 nV.

Minimalizowanie wpływu błędu granicznego woltomierza, będącego detektorem zera oraz jego nieliniowości, zostało zrealizowane dzięki umożliwieniu wykonywania pomiarów tylko, gdy różnica napięć pomiędzy U_{JVS} i U_x jest mniejsza niż 10 mV, czyli stanowi 10 % najczulszego pomiaru zakresu napięcia stałego multimetru Agilent/HP 3458A, stosowanego na stanowisku JVS zainstalowanym w GUM. Dzięki temu zabiegowi wkład tych składowych do budżetu niepewności wynosi ok. 3 nV.

Powyższe składowe niepewności są wyznaczane metodą obliczeniową typu B.

Niepewność pochodzącą od pozostałych źródeł niepewności można wyznaczyć mierząc napięcie zerowe złącza. W tym celu przy zwartych zaciskach wykonuje się n pomiarów napięcia zerowego U_0 . Niepewność, przyjmująca ok. 20 nV, wyznaczana jest ze wzoru

$$u(U_0) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n U_{0i}^2}{n}} \quad (11)$$

Niepewność pomiaru typu A wyznaczana jest każdorazowo z serii pomiarowej. Każdy pomiar składa się z 48 odczytów różnicy napięcia wzorca i źródła badanego. Pierwszy i trzeci tuzin pomiarów wykonywany jest w polaryzacji dodatniej, drugi oraz czwarty – w ujemnej. Dwa pierwsze lub najbardziej odbiegające od średniej pomiary z każdej dwunastki są odrzucane, do analizy brane jest pod uwagę 40 pomiarów. Zatem niepewność $u(U_x)$ typu A można wyznaczyć korzystając z zależności (12)

$$u(U_x) = \sqrt{\frac{s^2(U_x)}{40}} \quad (12)$$

gdzie $s(U_x)$ – odchylenie standardowe eksperymentalne mierzonego napięcia U_x .

Złożoną niepewność pomiaru $u_c(U)$ wyznacza się następująco

$$u_c(U) = \sqrt{u^2(U_f) + u^2(U_{R_L/R_p}) + u^2(U_0) + u^2(U_x)} \quad (13)$$

Ponadto pomiary wykonywane są w czasie 1 – 2 tygodni, aby wyznaczyć współczynnik dryftu wzorca napięcia. W tym czasie obserwowana jest także temperatura, w jakiej jest przeprowadzany pomiar, aby wyznaczyć współczynnik temperatury badanego źródła napięcia. Oba współczynniki wyznacza się stosując regresję liniową.

4.2. Szacowanie niepewności pomiaru na stanowisku wzorca rezystancji

W przypadku wzorca wykorzystującego kwantowe zjawisko Halla, układ do porównania badanych rezystorów z wzorcem jest źródłem niepewności pomiaru.

Równanie pomiaru (14), gdzie R_H – rezystancja uzyskana z kwantowego zjawiska Halla, N_s – ilość zwojów w gałęzi mostka gdzie umieszczono wzorec, N_x – ilość zwojów w gałęzi mostka gdzie umieszczono rezystor mierzony R_x , uwzględnia trzy poprawki, z którymi związane są główne składniki niepewności pomiaru

$$R_x = R_H \cdot (1 + \delta R_H) \cdot \frac{N_s}{N_x} \cdot (1 + \delta N) \cdot (1 + \delta R_H) \quad (14)$$

Składnik δR_H związany jest z odtwarzaniem jednostki rezystancji z QHE. Oznacza ona niedoskonałość próbki odtwarzającej opór elektryczny oraz rezystancję połączeń. Ma on znikomy wpływ na niepewność pomiaru.

Za przeniesienie jednostki odpowiada CCC. Poprawka oznaczająca odchylenie względne δN mierzonego stosunku rezystancji R_x/R_H od stosunku nominalnego N_s/N_x jest związana z błędem granicznym komparatora CCC. Na niepewność pochodzącą od kriogenicznego komparatora prądowego wpływają: niedokładność uzwojeń, upływność izolacji przewodów, niedokładność stanu równowagi komparatora, błąd wzmocnienia w pętli PLL, wzmocnienie szumów, offset prądowy, rezystancja kontaktów, niestabilność prądu pomiarowego.

Składnik δR_x związany jest z udziałem opornika wzorcowanego w budżecie niepewności. Udział szumu, dryftu czasowego oraz zmiany wartości rezystora wraz ze zmianą temperatury nie są bez znaczenia. Najczęściej jednak oszacowanie niepewności pochodzącej od tego składnika stanowi część niepewności typu A, a to dzięki utrzymywaniu rezystorów badanych w temperaturze bliskiej temperatury 23 °C ze stabilnością długoterminową lepszą niż 10 mK. Przeniesienie jednostki wykonujemy dla dwóch wartości rezystancji wzorcowej, ok. 6,5 kΩ i 13 kΩ. Zatem wyznaczając względną różnicę rezystancji mierzonej Δr_x , pochodzącej z pomiarów rezystancji na drugim R_{x2} i czwartym plateau R_{x4} , można oszacować niepewność typu B przeniesienia jednostki przy pomocy kriogenicznego komparatora prądowego

$$\Delta r_x = \frac{|R_{x2} - R_{x4}|}{R_{xnom}} \quad (15)$$

R_{xnom} to wartość nominalna opornika mierzonego (100 Ω).

Wyznaczona różnica może być potraktowana jako granica równomiernego rozkładu prawdopodobieństwa. Zatem niepewność $u(R_x)$ typu B, związaną z przeniesieniem jednostki z QHE na wzorcowy rezystor 100 Ω, wyrażamy jako

$$u(R_x) = \frac{1}{2} \frac{\Delta r_x}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

5. Podsumowanie

Wzorce wykorzystujące zjawiska kwantowe są najlepszymi realizacjami jednostek. Kwantowy charakter zjawisk w znacznym stopniu uniezależnia przekazanie jednostki od dokładności i stabilności przyrządów pomocniczych. Spójność pomiarowa zagwarantowana jest poprzez udział w porównaniach międzynarodowych oraz stosowanie ogólnie przyjętych wartości stałych opublikowanych przez komitet CODATA [14].

Niepewność wyznaczenia stałych nie powinna być brana do budżetu niepewności, ze względu na stały charakter zjawisk oraz umowne stosowanie konwencjonalnych wartości stałych w czynnościach metrologicznych. Wyznaczenie wartości stałych fizycznych pozostaje nadal tematem badań, co skutkuje okresowym uaktualnianiem uznanych wartości stałych.

Literatura

- [1] M. Planck: *On the law of distribution of energy in the normal spectrum*. Annalen der Physik, 4, 1901.
- [2] B. D. Josephson: *Possible new effects in superconductive tunneling*. Physics Letters, 1962.
- [3] K. von Klitzing: *The quantized Hall effect*. Rev. Mod. Phys., 58, 1986.
- [4] W. Nawrocki, M. Wawrzyniak: *Zjawiska kwantowe w metrologii elektrycznej*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2003.
- [5] G. Geneves, F. Piquemal: *Argument for a direct realization of the quantum metrology triangle*. Metrologia 37, 2000.
- [6] A. Barone, G. Paterno: *Physics and Applications of Josephson Effect*. Willey & Sons, 1982.
- [7] C. A. Hamilton, C. Burroughs, K. Chieh: *Operation of NIST Josephson Array Voltage Standards*. Journal of Research of the NIST, 95, 3, 1990.
- [8] R. Behr i in.: *Josephson arrays at 70 GHz for conventional and programmable voltage standard*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 48, 1999.
- [9] K. I. Wysokiński: *Quantum Hall Effect: the fundamentals*. Metrology and Measurement Systems XIII, 2006.
- [10] E. Dudek: *Kwantowy efekt Halla i jego zastosowanie do odtwarzania jednostki miary oporu elektrycznego*. Podstawowe Problemy Metrologii, Ustroń, maj 2005.
- [11] P. Kleinschmidt, J. M. Williams, N. E. Fletcher, T. J. B. M. Janssen: *A cryogenic current comparator for quantum Hall resistance ratio measurements*. BEMC 2001 – 10th British Electromagnetic Measurement Conference, Harrogate, Wielka Brytania, 2001.
- [12] M. Mosiądz, M. Orzepowski: *Zastosowanie kriogenicznego komparatora prądowego do przekazywania jednostki miary rezystancji*. Pomiary Automatyka Kontrola, tom 53, nr 9, 2007.
- [13] C. A. Hamilton, Y. H. Tang: *Evaluating the uncertainty of Josephson voltage standards*. Metrologia, 36, 1999.
- [14] CODATA Recommended Values, <http://physics.nist.gov/cuu/Constants>.