



METROLOGIA

Biuletyn Głównego Urzędu Miar

Nr 3(14)

październik 2009



W bieżącym numerze:

<i>Wzorce wielkości elektrycznych oparte na zjawiskach kwantowych</i> – E. Dudek, M. Mosiądz, M. Orzepowski	3
<i>Odtwarzanie i przekazywanie jednostki mocy kermy w powietrzu dla promieniowania gamma</i> – E. Kaczorowska, M. Derlaciński, A. B. Knyziak	17
<i>Historyczne źródła niepewności pomiaru</i> – P. Fotowicz	26
<i>Postępy prac przy opracowywaniu nowych dokumentów dotyczących wyrażania niepewności pomiaru</i> – P. Fotowicz	29
<i>Informacja o książce prof. Stanisława Adamczaka</i>	30

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

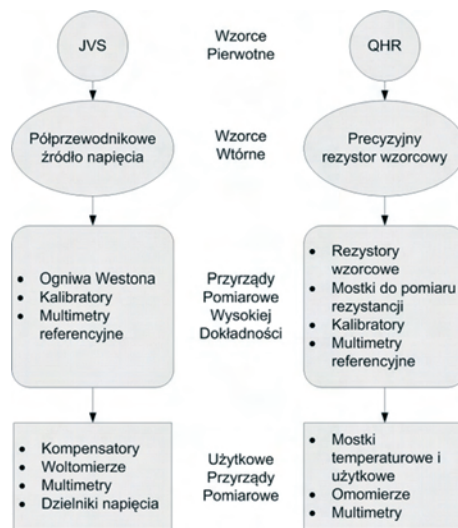
Progress in electrical metrology gave the possibility to switch from traditional standards based on material properties to primary quantum standards, which improved measurement capabilities and quality of measurement results. Quantum standards reproduce the dc voltage unit (1 volt) with the help of the 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.

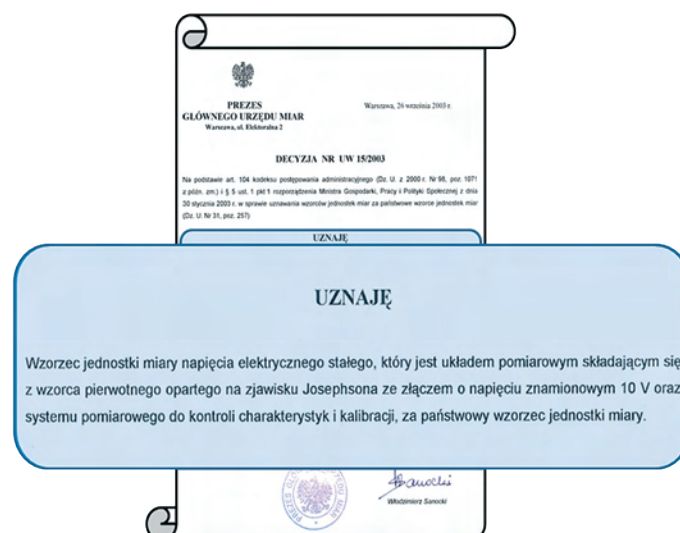


Rys. 1. Hierarchiczny układ przekazywania jednostek miar napięcia i rezystancji

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, φ – 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

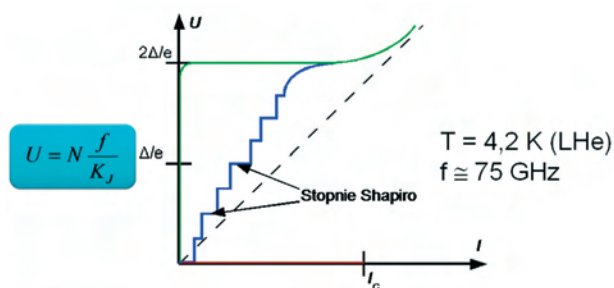
$$f = \frac{\partial\varphi}{\partial t} = \frac{4\pi Ue}{h} \quad (2)$$

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

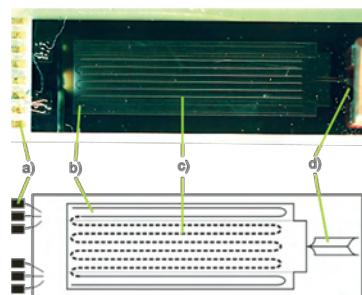
Wynika stąd, że proces ten można odwrócić, czyli oświetlając złącze Josephsona promieniowaniem mikrofalowym o stałej częstotliwości i przepuszczając przez nie stały prąd I , obserwuje się stopnie stałego napięcia na charakterystyce prądowo-napięciowej złącza SIS, zwane stopniami Shapiro [6]. Zastosowanie 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



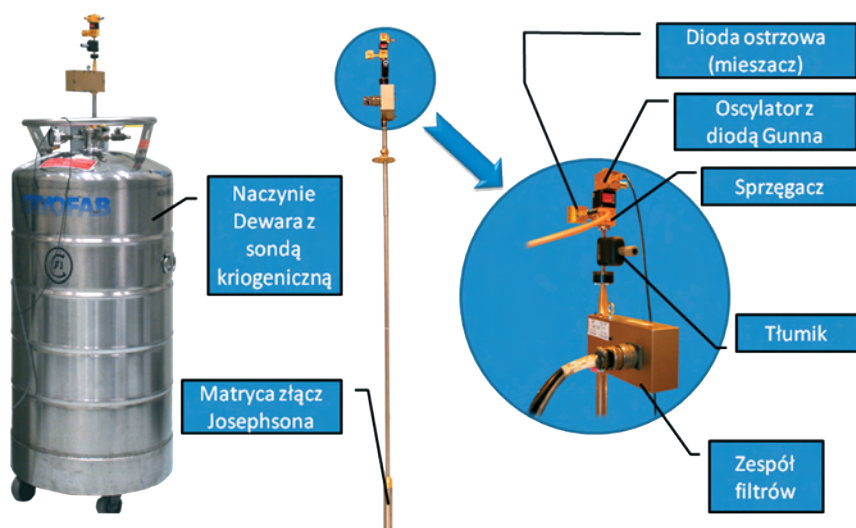
Rys. 7. Matryca złącz Josephsona: a) kontakty DC, b) rezystywne podłoże c) szeregowo połączone złącza SIS, d) antena mikrofalowa

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 ± 10 V zbudowana jest z ok. piętnastu tysięcy złącz.

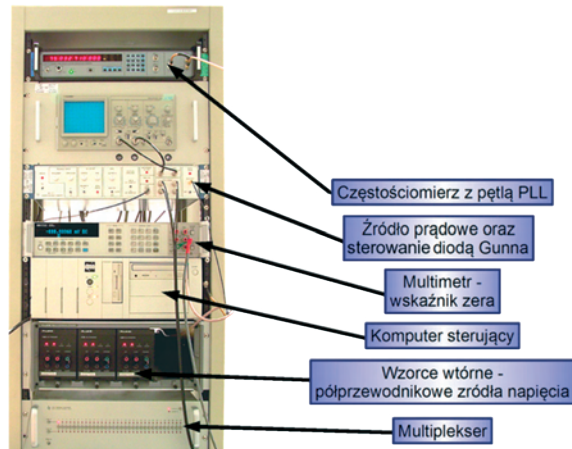
Stanowisko wzorca napięcia

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.



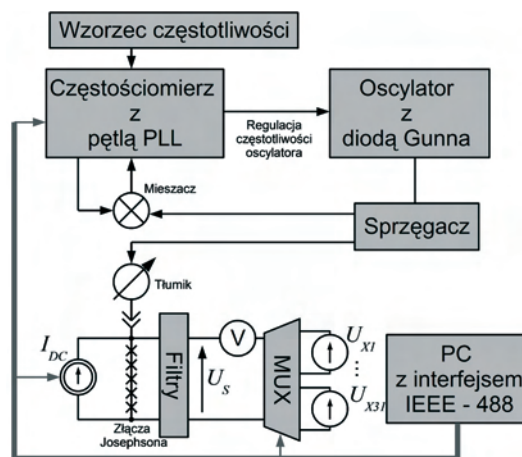
Rys. 8. Układ kriogeniczny i obwód mikrofalowy umieszczony na sondzie

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

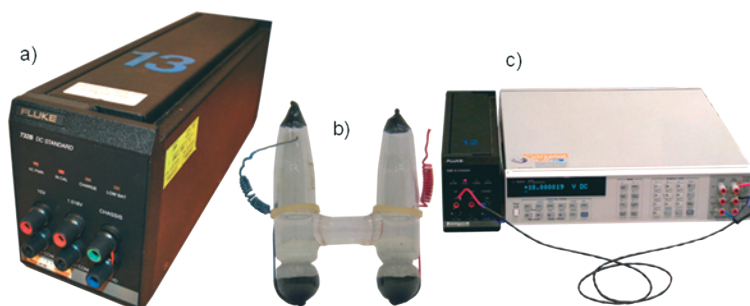
Mieszacz połączony jest z częstościomierzem mikrofalowym realizującym pętlę PLL (rys 10). W wyniku mieszania sygnału generowanego przez oscylator mikrofalowy z heterodyną licznika, powstaje między innymi składowa będąca różnicą tych dwóch sygnałów. Składowa ta ma niższą częstotliwość niż sygnał z oscylatora 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 1Ω . 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 Ω i 10 k Ω) [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.



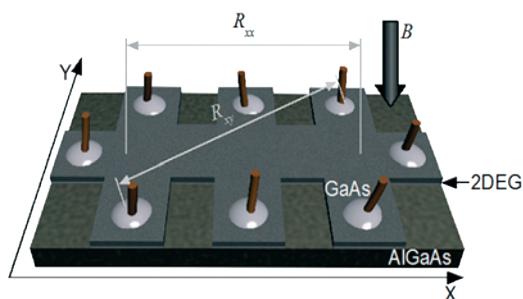
Rys. 12. Pracownia rezystancji

Kwantowy efekt Halla

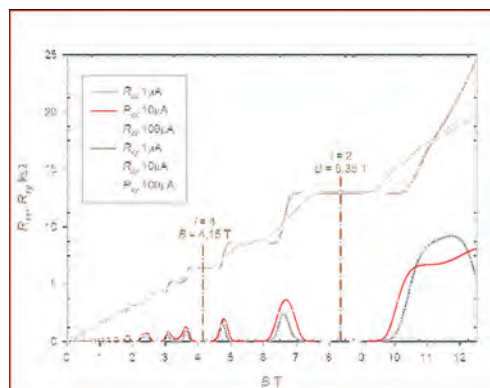
Dotychczasowe wzorce rezystancji były wzorcami materialnymi wymagającymi zapewnienia stałych warunków środowiskowych i monitorowania stabilności. Badania półprzewodników w niskich temperaturach i polach magnetycznych doprowadziły do odkrycia kwantowego efektu Halla. Stosunkowo niedawno odkryte zjawisko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

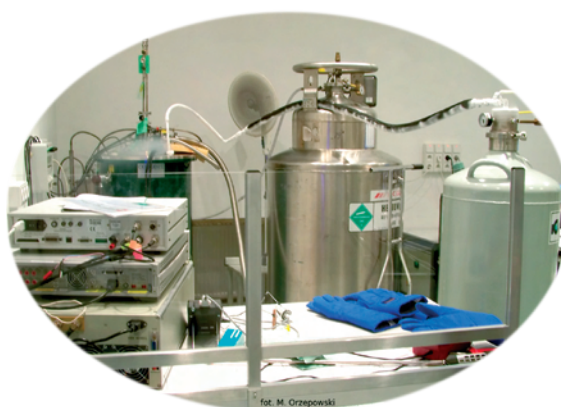
$$R_{xy} = \frac{h}{qei} = \pm \frac{h}{e^2i} = \pm \frac{R_K}{i} \approx \pm \frac{25812,807}{i} \Omega, \quad (4)$$

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).

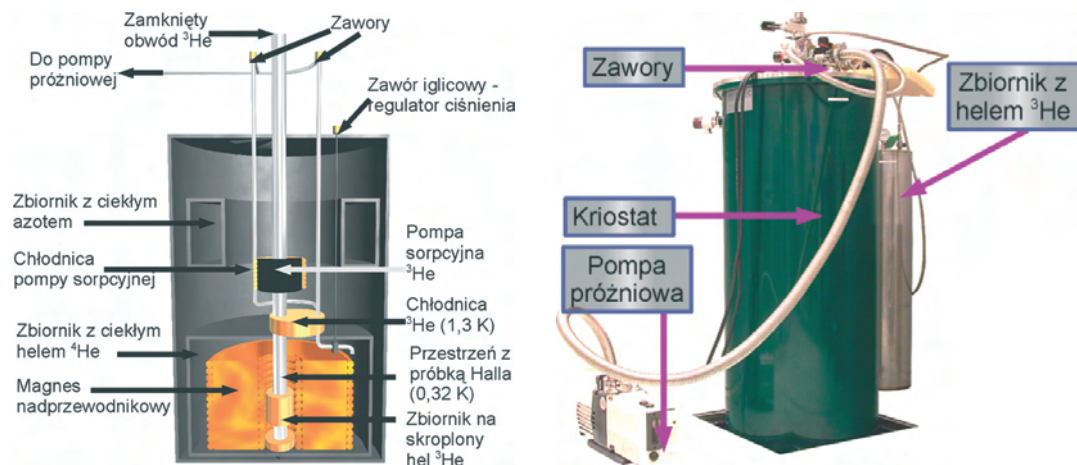
Stanowisko wzorca rezystancji

Heterostruktura odtwarzająca jednostkę rezystancji z kwantowego zjawiska Halla (próbka Halla), umieszczona jest w kriostacie wypełnionym skroplonym helu ^4He . 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 ^3He . 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 ^4He , którego ciśnienie obniżono przy pomocy pompy próżniowej do ok. 10 mbar.



Rys. 15. Stanowisko wzorca rezystancji

Po skropleniu helu ^3He znajduje się w zbiorniku na samym dnie sondy umieszczonej w kriostacie. Kolejnym etapem jest schłodzenie próbki Halla za pomocą par helu ^3He , 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-

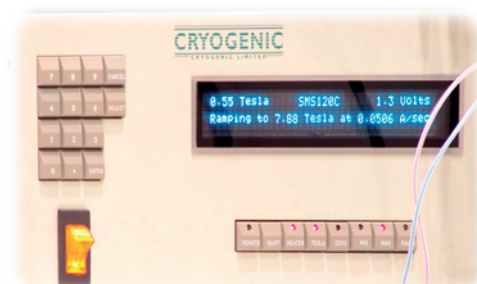


Rys. 16. Układ kriogeniczny do uzyskania kwantowego efektu Halla

kiego helu następuje adsorpcja molekuł ^3He . Chłodzenie pompy sorpcyjnej realizowane jest poprzez odpompowywanie par helu ^4He , 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

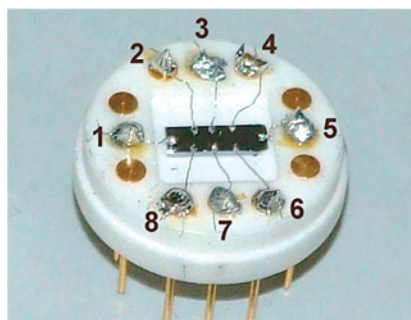


Rys. 18. Zasilacz elektromagnesu nadprzewodnikowego

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.

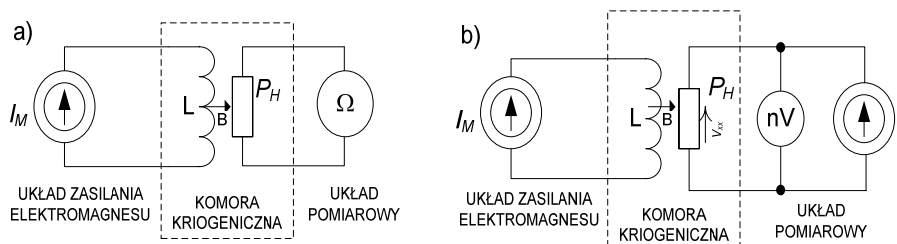
Badanie próbki Halla

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

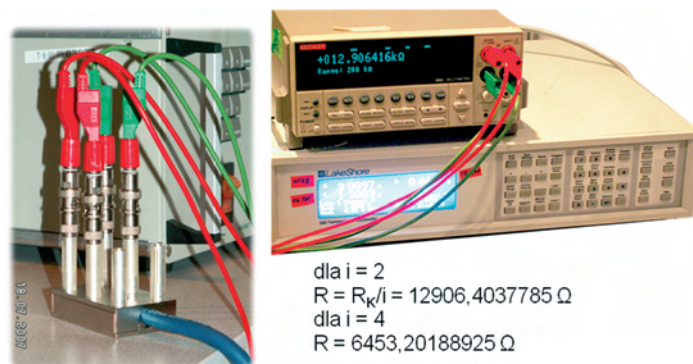
Przewody prądowe doprowadzone są do kontaktów 1 i 5. Napięcie V_{xy} mierzone jest pomiędzy kontaktami 3 i 7, natomiast spadek napięcia wzdłuż próbki, określający rezystancję V_{xx} , mierzony jest między kontaktami 2 i 4. Rezystancja kontaktów 6 i 8 wynosi 20Ω , a pozostałych poniżej 2Ω . Do doprowadzeń 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

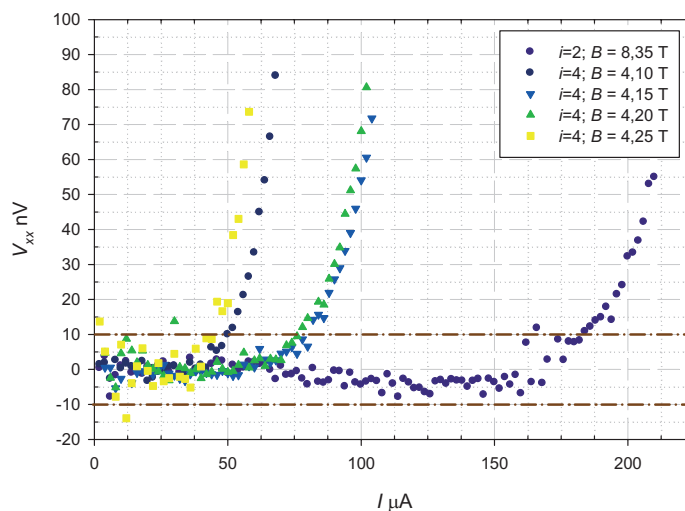
Na schemacie pomiarowym można wyróżnić układ zasilający elektromagnesu nadprzewodnikowego, komorę kriogeniczną z próbką Halla oraz układ pomiaru rezystancji. Pomiar rezystancji w obu kierunkach próbki przeprowadza się za pomocą multimetru cyfrowego przy $T = 0,35 \text{ K}$. Wyniki pomiarów ilustruje 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 Ω i $6,45$ k Ω) 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 100Ω . Następnie od wzorcowych rezystorów stuomowych jednostka jest przekazywana na cały typoszereg rezystorów (od 1Ω do 10 k Ω) z niepewnością względną rzędu 10^{-8} , przy zastosowaniu CCC. Z kolei, aby pokryć cały zakres pomiarowy (od $0,1$ m Ω do 1 T Ω), Laboratorium Wzorców Wielkości Elektrycznych, stosuje prądowy komparator rezystancji do $100\,000$ k Ω oraz wysokoomowy mostek rezystancyjny pozwalający przekazać jednostkę do 1 T Ω .

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).

Odtwarzanie i przekazywanie jednostki mocy kermy w powietrzu dla promieniowania gamma

Ewa Kaczorowska, Michał Derlaciński, Adrian Bożydar Knyziak

Główny Urząd Miar – Zakład Promieniowania i Wielkości Wpływających

W niniejszej pracy przedstawiamy stanowisko pomiarowe w Głównym Urzędzie Miar służące do odtwarzania i przekazywania jednostki kermy w powietrzu i jednostki mocy kermy w powietrzu w polu promieniowania gamma radionuklidów ^{137}Cs i ^{60}Co .

Reproduction and dissemination of the unit of kerma rate in air for gamma rays

In this work we introduce the measurement system at the Central Office of Measures (GUM), which is used for reproduction and dissemination of the unit of kerma rate in air that uses gamma rays of radionuclides ^{137}Cs and ^{60}Co .

Promieniowanie gamma

Promieniotwórczością (radioaktywnością) nazywamy przekształcanie się nietrwałych izotopów jednego pierwiastka chemicznego w izotopy innego pierwiastka, czemu towarzyszy emisja pewnych cząstek. Wszystkim rodzajom promieniotwórczości towarzyszy zwykle emisja promieniowania γ (gamma) – twardego, krótkofalowego promieniowania elektromagnetycznego. Emisja promieniowania gamma stanowi podstawowy sposób zmniejszania energii wzbudzonych produktów przemian promieniotwórczych. Jądro ulegające rozpadowi promieniotwórczemu nazywamy jądrem macierzystym. Powstające podczas rozpadu jądro pochodne jest z reguły w stanie wzbudzonym, a jego przejściu do stanu podstawowego towarzyszy emisja kwantu gamma. Zjawisko promieniotwórczości naturalnej odkrył francuski fizyk Antoine Henri Becquerel w roku 1896. Następnie kontynuował badania włączając w nie Piotra Curie i Marię Skłodowską-Curie. W 1898 r. odkrywają oni rad, który jest źródłem promieniowania gamma. W roku 1903 otrzymali oni wspólnie nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki za odkrycie promieniotwórczości i badanie tego zjawiska.



Odkrywca zjawiska promieniotwórczości
Antoine Henri Becquerel

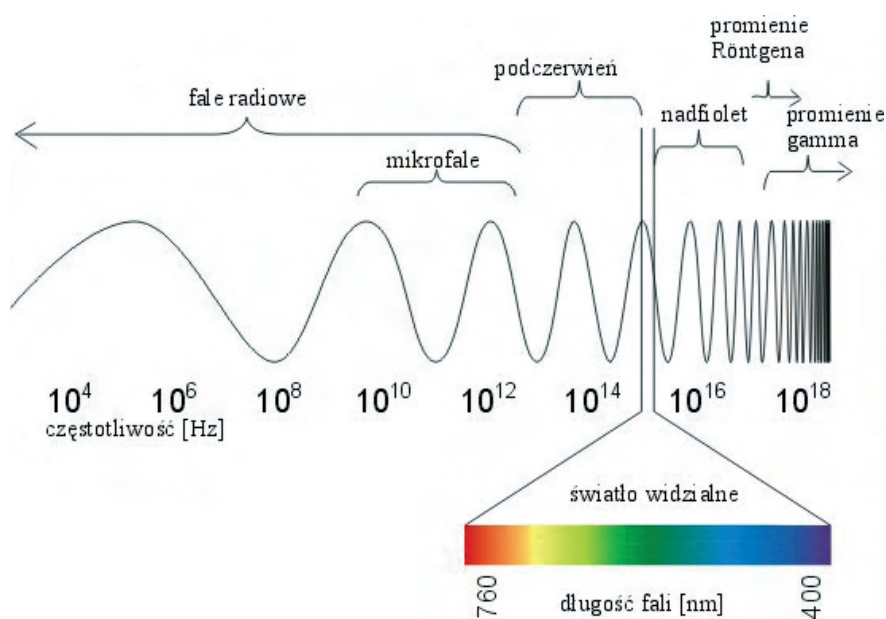


Małżeństwo Piotr Curie
i Maria Skłodowska-Curie przy pracy

Promieniotwórczość związana jest z emisją promieniowania jonizującego. Promieniowanie jonizujące jest to promieniowanie elektromagnetyczne (gamma i rentgenowskie) oraz korpuskularne (cząstki alfa, elektrony, neutrony, jony), które wywołuje jonizację ośrodka materialnego, tj. oderwanie przynajmniej jednego elektronu od atomu lub cząsteczki, albo wybicie go ze struktury krystalicznej. Odkrycia promieniowania gamma towarzyszącego zjawisku promieniotwórczości dokonał Paul Villard w roku 1900. W 1934 r. Irena i Fryderyk Joliot-Curie odkryli nowe źródło promieniowania gamma – sztuczne ciała promieniotwórcze.

Promieniowanie gamma powstaje w wyniku:

- rozpadu promieniotwórczego, w którym jądra atomowe pierwiastków promieniotwórczych, powstałe w wyniku rozpadu, znajdują się w stanie wzbudzonym. Powrót do stanu podstawowego, o niższej energii, powoduje emisję fotonu gamma;
- reakcji syntezy, w których dwa jądra atomowe zderzają się, tworząc nowe jądro w stanie wzbudzonym, którego przejściu do stanu podstawowego może towarzyszyć emisja jednego lub wielu fotonów gamma;
- anihilacji, w której w wyniku zderzenia cząstki i antycząstki, obie ulegają przemianom w fotony gamma.



Umieszczenie promieniowania gamma w spektrum fal elektromagnetycznych

Duża częstotliwość promieniowania gamma, a co się z tym wiąże duża ilość energii przenoszonej i krótka długość fali (poniżej 10 pm) sprawiają, że jest ono bardzo przenikliwe i przechodzi przez wszystkie ciała, niezależnie od ich stanu skupienia. Przy przechodzeniu przez materię część promieniowania padającego zostaje zatrzymana, przez co wiązka promieniowania doznaje osłabienia natężenia. Stopień osłabienia zależy od cech fizycznych osłabiającej materii oraz od długości fali promieniowania. Krótkofalowe promieniowanie wykazuje większą przenikliwość niż długofalowe. Przejściu promieniowania gamma przez materię towarzyszy zawsze powstanie wtórnego promieniowania elektronowego (fotoelek-

trony) i wtórnego promieniowania elektromagnetycznego (promieniowanie rozproszone). Promieniowanie gamma rozchodzi się w przestrzeni prostoliniowo, podobnie jak światło widzialne, z szybkością równą prędkości światła. Jest natomiast niewidzialne dla oka ludzkiego. Jak każde promieniowanie, które wychodzi z jednego punktu lub z ograniczonego obszaru, tak i promieniowanie gamma doznaje straty natężenia w miarę wzrastania odległości od źródła promieniowania. Wiadomo, że promieniowanie gamma nie ugina się w polu magnetycznym ani w polu elektrycznym. Ze względu na wyżej wymienione cechy, promieniowanie gamma posiada właściwości wywoływania zjawisk, które obejmujemy ogólnym mianem fizycznego, chemicznego i biologicznego działania promieniowania gamma.

Działanie fizyczne promieniowania gamma przejawia się w postaci jonizacji gazów. Powietrze i inne gazy są w normalnych warunkach obojętne elektrycznie. Pod wpływem promieniowania gamma ulegają jonizacji i stają się przewodnikami w polu elektrycznym. Zjawisko to jest wykorzystane w miernictwie promieniowania gamma. Z innych zjawisk o mniejszym znaczeniu należy wymienić wzrost temperatury ciał naświetlanych oraz zmianę barwy, jaką wykazują niektóre związki chemiczne poddane promieniowaniu gamma. Do chemicznego działania należy zaliczyć oddziaływanie promieniowania gamma na emulsję fotograficzną. Podobnie jak światło, promieniowanie gamma powoduje zaczernienie tej emulsji. Inną właściwością jest pobudzanie niektórych substancji do świecenia. Właściwości te wykorzystuje się w ocenie dawek promieniowania oraz w diagnostyce medycznej i przemysłowej.

Biologiczne działanie promieniowania gamma przejawia się w uszkodzeniu komórek, które może doprowadzić do choroby popromiennej czy nawet do śmierci organizmu w przypadku otrzymania zbyt dużej dawki. Ma też działanie mutagenne i rakotwórcze. Jednak nie należy zapominać, że to samo promieniowanie w małych dawkach wykorzystywane jest w diagnostyce medycznej (scyntygrafia i PET czyli pozytonowa tomografia emisyjna), a w dużych dawkach odpowiednio zaaplikowanych – do leczenia chorób nowotworowych (radioterapia i brachyterapia).

Wzorcowe źródła promieniowania gamma

Pierwszym naturalnym źródłem promieniowania gamma było źródło radowe. Oznaczenie ilości radu odbywało się najczęściej drogą pomiarów promieniowania gamma. W celu ujednoczenia pomiarów wykonywanych w różnych krajach, Komisja Wzorców wybrana w Brukseli w 1910 r. postanowiła utworzyć wzorzec międzynarodowy radu. Wzorzec ten został sporządzony w sierpniu 1911 roku przez Marię Skłodowską-Curie. Była to cienkościenna rurka szklana, zawierająca 21,99 mg bardzo czystego chlorku radu. W Wiedeńskim Instytucie Radowym sporządzono inny wzorzec zawierający 31,17 mg chlorku radu jako wzorzec pomocniczy. W roku 1912 komisja dokonała porównania obu wzorców i stwierdziła ich zupełną zgodność. Międzynarodowy wzorzec był przechowywany w Międzynarodowym Biurze Miar, skąd przenosiło się go do Instytutu Radowego w Paryżu w celu sprawdzania wzorców wtórnych.

Laboratoriom pomiarów promieniotwórczości zalecano posiadanie kilku wzorców o różnej zawartości radu, których wzajemne stosunki mas były dokładnie znane. Obecnie, w związku z rozwojem techniki jądrowej, uzyskuje się szereg innych izotopów będących źródłami promieniowania gamma.

Pomiar i rejestracja promieniowania gamma

Konieczność dokonywania pomiarów promieniowania gamma wynika nie tylko z jego zastosowań medycznych, naukowych, przemysłowych czy wojskowych, lecz przede wszystkim z jego szkodliwości dla zdrowia i życia człowieka. Wiemy, że promieniowanie gamma przechodząc przez ośrodek materialny dokonuje jego jonizacji. Zjawisko jonizacji jest wykorzystywane do pomiaru i rejestracji promieniowania. Do pomiarów promieniowania jonizującego, a w tym przypadku promieniowania gamma, służą przyrządy nazywane dawkomierzami. Złożone są one z dwóch zasadniczych części: detektora promieniowania (np. komora jonizacyjna, licznik proporcjonalny, licznik scyntylacyjny, detektor półprzewodnikowy) i układu elektronicznego mierzącego wielkość jonizacji (np. w postaci: impulsu elektrycznego, ładunku jonizacyjnego, prądu jonizacyjnego), która miała miejsce w detektorze promieniowania. W zastosowaniach metrologicznych takim najdokładniejszym detektorem jest prądowa komora jonizacyjna. Jest to swego rodzaju kondensator wypełniony powietrzem, do którego elektrod przyłożone jest wysokie napięcie.

W wyniku promieniowania, w powietrzu wypełniającym komorę jonizacyjną, powstają jony dodatnie oraz uwolnione elektrony, które pod wpływem pola elektrycznego wędrują do odpowiednich elektrod tworząc prąd jonizacyjny. Zakres prądów jonizacyjnych rozciąga się od 10^{-8} A do 10^{-16} A. Do pomiaru tych prądów wykorzystuje się urządzenia nazywane elektrometrami pracującymi w trybie pomiaru prądu lub ładunku elektrycznego. Na podstawie przeprowadzanych pomiarów można wyznaczyć wartość dawki promieniowania, np. dawki ekspozycyjnej, kermy, dawki pochłoniętej, dawki równoważnej, dawki efektywnej (skutecznej) oraz mocy poszczególnych dawek. Wszystkie one służą do oceny narażenia na promieniowanie, a jest ich tak dużo, gdyż że nie umiemy do końca opisać, od strony matematycznej, wszystkich zjawisk zachodzących przy napromieniowaniu żywego organizmu.

Jednostka miary dawki ekspozycyjnej w polu promieniowania gamma

Dawka ekspozycyjna X jest miarą jonizacji powietrza pod wpływem promieniowania X lub γ i służy wyłącznie do oceny narażenia na to promieniowanie. Definiowana jest jako iloraz dQ i dm , gdzie dQ jest wartością bezwzględną sumy ładunków jonów jednego znaku wytworzonych przez fotony w suchym powietrzu, gdy wszystkie elektrony uwolnione w powietrzu o masie dm są całkowicie zahamowane. Jednostką dawki ekspozycyjnej w układzie SI jest kulomb na kilogram (C/kg). Dawniej jednostką dawki ekspozycyjnej był rentgen (R). Określał on ilość promieniowania rentgenowskiego lub promieniowania gamma wytwarzającą przez jonizację ładunek elektryczny $2,58 \cdot 10^{-4}$ kulombów w kilogramie czystego, suchego powietrza w warunkach normalnych (tzn. w temperaturze 273,15 K i ciśnieniu 1013,25 hPa). Pierwotnie jednostka ta odnosiła się tylko do promieniowania rentgenowskiego. W roku 1928 na Kongresie Radiologii w Sztokholmie uzgodniono, że 1 rentgen jest to dawka, która wytwarza jedną jednostkę elektrostatyczną ładunku elektrycznego w jednym centymetrze sześciennym standardowego suchego powietrza. W roku 1937 z czysto praktycznych powodów objętość jednego centymetra sześciennego powietrza zastąpiła w definicji masa 1,293 mg powietrza. Decyzją CIPM z roku 1978 dopuszcza się używania jednostki rentgena wraz z jednostkami SI. Obecnie w Polsce rentgen jest jednostką spoza

układu SI, dopuszczoną w Polsce warunkowo ze względu na pewną liczbę dawkomierzy wyskalowanych w tej jednostce.

Jednostka miary kermy w powietrzu w polu promieniowania gamma

Strumień fotonów promieniowania gamma to strumień cząstek nienaładowanych, które oddziałują elektromagnetycznie z elektronami, wybijając je z atomów i tworząc w ten sposób jony, a wybite elektrony są źródłem wtórnej jonizacji. Uwzględnienie wtórnej jonizacji w obliczeniach dawek pochłoniętych wymaga znajomości wielkości fizycznej zwanej kerma. Kerma (ang. Kinetic Energy Released in MATter) jest sumą początkowych energii kinetycznych dE wszystkich naładowanych cząstek jonizujących uwolnionych przez nienaładowane cząstki w materiale o masie dm

$$K = \frac{dE}{dm}$$

Jednostką tej wielkości fizycznej, wprowadzoną decyzją CIPM w roku 1975 w układzie SI jest grey, czyli jeden dżul na kilogram (J/kg). Jednostka miary kermy w powietrzu jest o wiele bardziej użyteczna od jednostki miary dawki ekspozycyjnej i obecnie ją zastąpiła. Wielkość jonizacji jest proporcjonalna do energii. Zatem w komorach jonizacyjnych mierzona jest wartość kermy w powietrzu. Jednostka miary kermy w powietrzu stała się podstawową jednostką miary, z której poprzez przeliczenia uzyskuje się wartości innych jednostek miary stosowanych w dozymetrii, takich jak dawka pochłonięta, dawka równoważna czy dawka efektywna.

Historia stanowiska pomiarowego jednostki mocy kermy

Historia Laboratorium Promieniowania Jonizującego rozpoczyna się w roku 1955. Prezes ówczesnego GUM, Hilary Dziewulski, utworzył Pracownię Radiologiczną, która miała wzorcować preparaty promieniotwórcze i przyrządy do pomiaru promieniotwórczości. W momencie utworzenia Pracowni brak było w kraju jakichkolwiek wzorców odniesienia w tej dziedzinie i prace metrologiczne należało zaczynać od zera. W latach 1961 – 1965 zbudowane zostały w laboratorium pomiarów promieniowania jonizującego wzorce definicyjne dawki ekspozycyjnej promieniowania X i gamma. Wzorce te należą do nielicznej grupy urządzeń tego typu istniejących na świecie.

Opracowano metody wzorcowania zamkniętych źródeł oraz dawkomierzy promieniowania gamma. Równoległe z tworzeniem stanowisk pomiarowych zakupiono wzorcowe źródła promieniowania gamma. Laboratorium posiadało zespół wzorcowych źródeł ^{137}Cs obejmujący zakres aktywności od 5 mCi do 1000 mCi oraz zespół wzorcowych źródeł ^{60}Co o aktywności 0,5 mCi do 500 mCi. Odrębną grupę źródeł stanowiły źródła radowe, zarówno ze względu na znaczenie historyczne, jak i specyfikę pomiarową. Jedną z istotnych cech wyróżniających źródła radowe jest określenie wielkości źródła masą zawartego w nim radu. Laboratorium posiadało dwa wzorce państwowe radu o wartości nominalnej 15 mg i 25 mg, otrzymane w grudniu 1956 r. i 6 wzorców wtórnych zakupionych w grudniu 1959 r. Zawartość radu we wzorcach państwowych została wyznaczona z dokładnością 0,25 % przez porównanie jonometryczne z dwoma wzorcami Hönigschmida: ze wzorcem belgij-

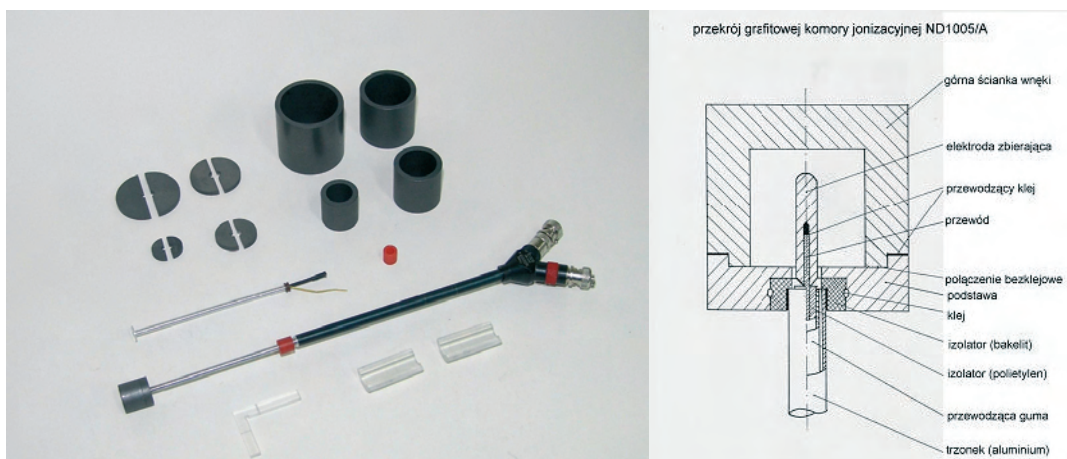
skim w roku 1956 i wzorcem zachodnioniemieckim w roku 1960. Oba wzorce Hönigschmida były porównane z międzynarodowym wzorcem radowym. W latach 1968 – 1969 przeprowadzono międzynarodowe porównania wzorcowych zamkniętych źródeł ^{60}Co . Obecnie w laboratorium nie wzorcuje się zamkniętych źródeł.

Pierwszym wzorcem państwowym jednostki dawki ekspozycyjnej i jednostki mocy dawki ekspozycyjnej promieniowania gamma była grafitowa kawitacyjna komora jonizacyjna o zmiennej grubości ścianek (oznaczona G4), wykonana w GUM w 1965 r. Komora była przystosowana do pomiarów w polu promieniowania gama ^{137}Cs i ^{60}Co . Jej błąd graniczny wynosił $\pm 1,5\%$ dla poziomu ufności 0,99. W latach 1974 – 1990 wzorzec państwowy brał udział w porównaniach międzynarodowych w ramach RWPG.

W latach 1978 – 1982, w pomieszczeniu piwnicznym, powstała Pracownia Klasy Z, w której zamontowano dwa źródła o dużej aktywności: ^{137}Cs i ^{60}Co . Zbudowano również stanowisko pomiarowe do pomiaru prądów i ładunków jonizacyjnych. Pracownia została wyposażona w urządzenia mechaniczne konieczne do załadunku pojemników roboczo-transportowych ze źródłami. W 1991 r. zakupiono nowy wzorzec pierwotny, grafitową komorę jonizacyjną ND 1005/A z kubkami. W latach 1996 i 2006 wzorzec pierwotny brał udział w porównaniach z BIPM. Obecnie laboratorium posiada dwa takie wzorce.

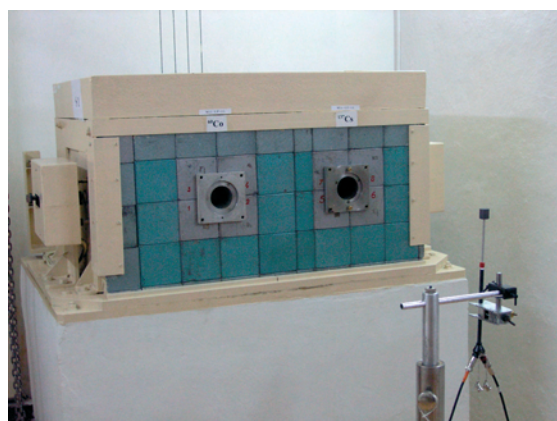
Stanowisko wzorcowe do odtwarzania i przekazywania jednostki mocy kermy w powietrzu w polu promieniowania gamma

Stanowisko wzorcowe służy do odtwarzania i przekazywania jednostki dawki ekspozycyjnej, jednostki mocy dawki ekspozycyjnej, jednostki kermy w powietrzu i jednostki mocy kermy w powietrzu w polu promieniowania gamma w zakresie energii fotonów gamma w zakresie energii fotonów promieniowania gamma $600\text{ keV} \div 3\text{ MeV}$ wzorcem pierwotnym jednostki dawki ekspozycyjnej, jednostki mocy dawki ekspozycyjnej, jednostki kermy i jednostki mocy kermy jest komora jonizacyjna ze ściankami grafitowymi o zmiennej grubości.

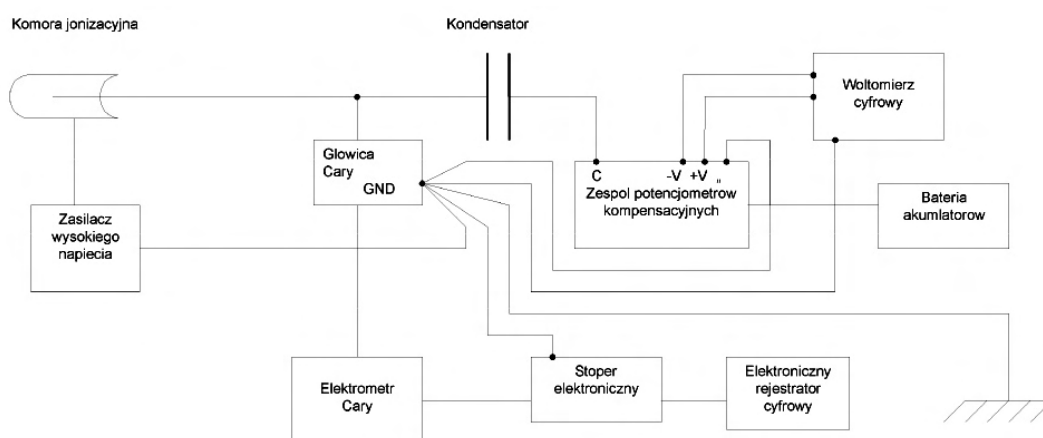


Wzorzec pierwotny – grafitowa komora jonizacyjna ND1005/A

W skład stanowiska wzorcowego wchodzi komora jonizacyjna połączona ze źródłem napięcia polaryzacji oraz urządzeniem do pomiaru ładunków i prądów jonizacyjnych.



Komora wzorcowa na stanowisku pomiarowym gamma i zespół pojemników ze źródłami gamma



Blokowy schemat stanowiska wzorcowego wraz z układem Townsenda do pomiaru prądów i ładunków jonizacyjnych

Pomiar prądów jonizacyjnych dokonywany jest za pomocą metody kompensacyjnej Townsenda, w której ubytek lub przyrost ładunku elektrycznego, wywołany prądem jonizacyjnym, wyrównywany jest przez doprowadzenie lub odprowadzenie z układu takiego samego ładunku. Elektrometr włączony jest w tym przypadku jako wskaźnik zera. Ładunek doprowadza się do jednej z okładek kondensatora C z elektrody komory jonizacyjnej, natomiast do drugiej okładki przykładane jest napięcie kompensacji U , czerpane z potencjometru. Prąd jonizacyjny I wyrażony zależnością

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

przenosi na elektrodę w czasie Δt ładunek ΔQ . Równy co do wartości bezwzględnej, lecz przeciwnego znaku ładunek doprowadzany jest do niej, a przez przesunięcie suwaka potencjometru zmienia się napięcie drugiej okładki kondensatora o ΔU tak, aby

$$\Delta Q = C\Delta U$$

Uzupełnieniem są przyrządy pomiarowe służące do pomiaru temperatury, ciśnienia i wilgotności powietrza. Jako urządzenia pomocnicze służą źródła promieniotwórcze gamma zawierające nuklidy ^{137}Cs i ^{60}Co , umieszczone w pojemnikach transportowo-roboczych z kolimatorami i przesłonami wiązek. Źródła te, jak i wszystkie inne, podlegają prawu połowicznego rozpadu. W celu utrzymania odpowiedniego poziomu aktywności promieniotwórczej, a co za tym idzie odpowiednich parametrów metrologicznych, należy dokonywać wymiany źródeł promieniowania: w przypadku ^{60}Co co 5 lat, a w przypadku ^{137}Cs co 30 lat. Pozostałe urządzenia pomocnicze to: ława pomiarowa z wyposażeniem i urządzenie optyczne służące do precyzyjnego ustawienia komory w wiązce promieniowania oraz zestaw telewizji przemysłowej.

Odtwarzanie jednostki miary kermy w powietrzu w polu promieniowania gamma

Szybkość rozpadów promieniotwórczych nie zależy od czynników fizykochemicznych. Liczba kwantów gamma wysyłanych przez źródła promieniowania w danym kierunku jest stała. Dlatego łatwiej jest dokonywać pomiaru wielkości mocy kermy. Moc kermy w powietrzu \dot{K} jest to iloraz dK i dt , gdzie dK jest przyrostem kermy w przedziale czasu dt . Jednostką mocy kermy w powietrzu jest grej na sekundę (Gy/s). Poprawną wartość mocy kermy w powietrzu \dot{K} uzyskujemy przy użyciu wzorca pierwotnego, którym jest grafitowa komora jonizacyjna, odczytując wartości zebranego ładunku elektrycznego w czasie (prąd jonizacyjny) i wyliczając poprawną wartość mocy kermy w powietrzu \dot{K} przy użyciu wzoru

$$\dot{K} = \frac{I}{m} \frac{W}{e} \frac{1}{1 - \bar{g}} \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{a,c}} \bar{s}_{\text{c,a}} \Pi k_i$$

gdzie: I/m – mierzony prąd jonizacyjny na jednostkę masy powietrza w komorze wzorcowej, W – średnia energia zużyta przez elektron o ładunku e na wytworzenie pary jonów, \bar{g} – stosunek energii wtórnych cząstek naładowanych, zużytej na wytworzenie promieniowania hamowania, do sumy energii tych cząstek, $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{a,c}}$ – stosunek masowych współczynników pochłaniania energii promieniowania w powietrzu i graficie, $\bar{s}_{\text{c,a}}$ – stosunek średnich masowych zdolności hamowania grafitu i powietrza, Πk_i – iloczyn współczynników korekcyjnych użytych do określenia kermy w powietrzu komorą wzorcową.

Wyniki pomiarów korygowane są do warunków odniesienia, gdyż w przypadku komory jonizacyjnej substancją napromieniowywaną jest powietrze zawarte wewnątrz otwartej komory. Znając dokładnie objętość komory jonizacyjnej i gęstość powietrza można obliczyć jego masę. Powietrze może swobodnie przepływać do, jak i z komory jonizacyjnej. Zatem gęstość powietrza będzie zależała od temperatury i ciśnienia. Na podstawie odczytu wartości temperatury i ciśnienia wyliczany jest współczynnik poprawkowy k_D wyrażony wzorem

$$k_D = \frac{p_0}{p} \cdot \frac{T}{T_0}$$

gdzie: p_0 – ciśnienie odniesienia równe 1013,25 hPa, p – ciśnienie atmosferyczne w trakcie realizacji pomiarów w hPa, T – temperatura powietrza w trakcie realizacji pomiarów równa $273,15 + t$, gdzie t temperatura w °C, T_0 – temperatura odniesienia równa 293,15 K.

Na stanowisku wzorcowym laboratorium odtwarza jednostkę miary mocy kermy w powietrzu z niepewnością standardową: 0,24 % dla ^{60}Co i 0,29 % dla ^{137}Cs .

Przekazywanie jednostki miary kermy w powietrzu promieniowania gamma

Wzorcowanie dawkomierzy wykonuje się metodą podstawienia komór jonizacyjnych w polu promieniowania gamma, polegającą na kolejnym pomiarze komorą wzorcową, a następnie komorą wzorcowaną. Środki czynne komór muszą być umieszczone w tym samym, dowolnie wybranym, ustalonym punkcie pomiarowym. W czasie wzorcowania wyznacza się współczynniki wzorcowania k_γ , zależne od energii fotonów emitowanych przez nuklid (^{137}Cs lub ^{60}Co), stosując poniższy wzór

$$k_\gamma = \frac{\dot{K}}{M \cdot k_D}$$

gdzie: \dot{K} – poprawna wartość mocy kermy, M – wartość zmierzona przez dawkomierz wzorcowany, k_D – współczynnik poprawkowy uwzględniający odchyłkę warunków środowiskowych od warunków odniesienia ($t_0 = 20\text{ °C}$ i $p_0 = 1013,25\text{ hPa}$).

Do pomiarów dozymetrycznych wykorzystuje się bezpośrednio komorę wzorca pierwotnego lub porównane z nią wzorce wtórne.

Podsumowanie

Opisane stanowisko wzorcowe jest jedyne tego typu w kraju i nie ma odpowiednika w terenowej służbie miar. Stanowisko to służy do przekazywania jednostki miary do akredytowanych krajowych laboratoriów wzorcujących oraz do wzorcowania przyrządów pomiarowych stosowanych w przemyśle, nauce i ochronie radiologicznej.

Stosowana metoda manualnej kompensacji używana jest w metrologii od lat 20. XX w.; pomimo jej dużej dokładności jest ona jednak bardzo pracochłonna. W związku z tym prowadzone są obecnie prace modernizacyjne stanowiska pomiarowego, których celem jest automatyzacja układu pomiarowego ładunków i prądów jonizacyjnych przy jednoczesnej poprawie parametrów metrologicznych. Kolejnym etapem modernizacji będzie wyliczenie współczynników korekcyjnych przy pomocy metod obliczeniowych Monte Carlo, co pozwoli na dokładniejsze odtworzenie jednostki.

Historyczne źródła niepewności pomiaru

Problematykę niepewności pomiaru można wiązać z pojawieniem się Przewodnika, podstawowego dokumentu dotyczącego jej wyrażania, wydanego w roku 1993 i 1995 (Guide to the expression of uncertainty in measurement). Oba wydania praktycznie nie różnią się od siebie, poza kosmetycznymi zmianami redakcyjnymi. Dodatkowo tekst edycji z 1995 roku został upubliczniony w 2008 roku na stronach internetowych Międzynarodowego Biura Miar w postaci dokumentu JCGM 100:2008. Pracę nad tym dokumentem prowadzono od 1977 roku. Opublikowanie dzieła poprzedzały opracowania wydawane przez krajowe instytucje metrologiczne. Jednym z takich opracowań był materiał wydany w 1980 roku przez National Bureau of Standards w USA pt. „NBS communication manual for scientific, technical and public information”. Przedstawia on ogólną filozofię obliczania niepewności przedstawioną później w Przewodniku.

Obecnie trwają intensywne prace nad wypracowaniem uniwersalnej metodyki opracowania danych pomiarowych zgodnie z założeniami teorii niepewności mogącej mieć zastosowanie w każdej dziedzinie nauk przyrodniczych i technicznych. Kanon ten opracowywany jest w postaci pakietu dokumentów pod wspólnym tytułem „Evaluation of Measurement Data” przez Komitet Wspólny ds. Przewodników w Metrologii (Joint Committee for Guides in Metrology) pod przewodnictwem Międzynarodowego Biura Miar.

Powstaje pytanie, gdzie należałoby szukać początków kształtowania się współczesnej myśli w dziedzinie opracowania danych pomiarowych. Początki te historycznie można wiązać z trzema intelektualnymi osiągnięciami myśli matematycznej. Wszystkie pojawiły się prawie w tym samym czasie za sprawą trzech wybitnych intelektualistów z przełomu XVIII i XIX wieku.

Adrien Marie Legendre (1752 – 1833), Carl Friedrich Gauss (1777 – 1855) i Pierre Simon Laplace (1749 – 1827) za sprawą swoich publikacji stworzyli podstawy współczesnej metodyki opracowania danych pomiarowych. Przedstawili w nich trzy podstawowe rozwiązania, które współcześnie znane są pod nazwami: metoda najmniejszych kwadratów, prawo propagacji błędów oraz centralne twierdzenia graniczne. Przedstawione zostały, niejako na marginesie zasadniczych publikacji, kolejno w latach 1805, 1809 i 1810. Prace te nie tworzą oddzielnych dzieł, lecz raczej są uzupełnieniami szerszych opracowań.

Legendre w dziele pt. „Nouvelles methodes pour la determination des orbites des cometes”, które ukazało się w 1805 roku zamieszcza kilkustronicowy dodatek „Sur la methode des moindres quarrés”. Przedstawia w nim metodę minimalizacji sumy kwadratów błędów. Jeżeli przedstawimy równanie wielkości mierzonej w postaci liniowej to możemy zapisać szereg równań błędów tej wielkości

$$E_i = a_i + b_i x + c_i y + d_i z + \dots$$

gdzie a_i, b_i, c_i, \dots są znanymi współczynnikami, zaś x, y, z, \dots są nieznanymi wielkościami wejściowymi. Zmienne równania można wyznaczyć podnosząc do kwadratu błędy i sumując je tak, aby wyznaczały najmniejszą z możliwych wartości. Współcześnie metoda ta stosowana jest w analizie regresji.

Kolejne rozwiązanie przynosi praca Gaussa z 1809 roku pt. „Theoria Motus Corporum Coelestium in Sectionibus Conicis Solum Ambientium”. Autor przedstawia podobnie wyglądający liniowy układ równań

$$V_i = a_i x + b_i y + c_i z + \dots$$

i formułuje błąd jako różnicę pomiędzy obliczoną wartością V_i a zaobserwowaną M_i

$$\Delta_i = V_i - M_i$$

Prawdopodobieństwo błędu charakteryzuje krzywą $\varphi(\Delta_i)$, która jest symetryczna i osiąga maksimum dla $\Delta_i = 0$. Przyjmuje aksjomat, że najbardziej prawdopodobną wartością pojedynczej, nieznaney obserwacji jest średnia arytmetyczna zbioru danych, uzyskanego w tych samych warunkach pomiarowych podczas wielokrotnego powtarzania obserwacji. Postuluje, do opisu krzywej (rozkładu) błędu, przyjęcie funkcji

$$\varphi(\Delta) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 \Delta^2}$$

gdzie h jest stałą związaną z precyzją pomiaru. Jako ciekawostkę można dodać, że w oryginalnym zapisie dzieła znajduje się wzór bez nawiasów i znaku potęgowego

$$\varphi\Delta = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-hh\Delta\Delta}$$

Powyższy zapis to postać funkcji gęstości rozkładu normalnego (krzywej dzwonowej).

Znajdujemy w powyższym dziele również zapis równań błędu, podobny do zapisu różniczki zupełnej, w postaci sumy składowych poprzedzonych pochodnymi cząstkowymi. Jest to pierwotny zapis prawa propagacji błędu.

W 1810 roku Laplace w swoim „Supplement au memoire” formułuje tezę, że jeżeli błąd każdej obserwacji jest taki sam, to prawdopodobieństwo, iż błąd średniej n obserwacji będzie zawarty w granicach $\pm rh/n$, jest równe

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{k}{2k'}} \int \exp\left[-\frac{k}{2k'} r'^2\right] dr'$$

gdzie h jest długością przedziału, wewnątrz którego zawarty jest błąd pojedynczej obserwacji. Prawdopodobieństwo błędu zawartego w granicach od $x = -h/2$ do $x = h/2$ autor oznacza $\varphi(x/h)$ oraz definiuje, że

$$k = \int \phi\left(\frac{x}{h}\right) dx, \quad k' = \int \frac{x^2}{h^2} \phi\left(\frac{x}{h}\right) dx$$

Jako ciekawostkę można dodać, że w oryginale znajdujemy zapis powyższego wzoru całkowego w postaci (odwrócenie zapisu funkcji podcałkowej i użycie litery c do oznaczenia liczby e)

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{k}{2k'}} \cdot \int dr' \cdot c^{-\frac{k}{2k'} r'^2}$$

W ten sposób pojawia się teza jednego z podstawowych twierdzeń rachunku prawdopodobieństwa, a mianowicie centralnego twierdzenia granicznego.

Należy też dodać, że Laplace jeszcze w latach siedemdziesiątych XVIII stulecia formułuje trzy warunki dotyczące krzywej (rozkładu) błędu: ma być symetryczna względem wartości prawdziwej, gdyż obserwacje jednakowo odchylają się od niej w kierunku wartości większych i mniejszych; musi zdążać do zera oddalając się od wartości prawdziwej, gdyż prawdopodobieństwo, że wartość obserwacji może być nieskończenie różna od wartości prawdziwej jest równe zeru; obszar (pole powierzchni pod krzywą błędu) musi liczbowo być równy jeden, gdyż pewne jest zdarzenie, że każda obserwacja zawarta jest pod tą krzywą. Takie kryteria spełnia oczywiście krzywa rozkładu normalnego, ale propozycję jej zastosowania do opisu rozkładu błędu pomiaru przedstawił dopiero Gauss (Laplace początkowo uważał, że takie kryteria może spełnić wiele funkcji, m.in. funkcja logarytmiczna, $e(x) = (1/2a) \cdot \log(a/|x|)$, gdzie a wyznacza granicę przedziału błędu e).

Rozkład normalny jest jednym z podstawowych rozkładów rachunku prawdopodobieństwa, a ze względu na powyższe okoliczności nosi również nazwę rozkładu Laplace'a-Gaussa. Stał się on podstawą oceny wyniku pomiaru i jest jednym z założeń wykorzystywanych w teorii niepewności. Teoria ta bowiem zakłada, że każda obserwacja wywodzi się z populacji o rozkładzie normalnym. To oczywiście nie oznacza, że rozkład związany z wielkością mierzoną jest normalny. Ten należy dopiero wyznaczyć stosując metodę propagacji rozkładów wielkości wejściowych na podstawie modelu matematycznego wielkości wyjściowej.

Trzy wymienione powyżej historyczne rozwiązania tworzą podstawy współczesnej metrologii teoretycznej w dziedzinie opracowania wyniku pomiaru. Powstały one na wiele lat przed ich praktycznym zastosowaniem i, choć zostały przyjęte bez naukowego dowodzenia, świadczą o trafności wnioskowania. Powstały prawie w tym samym czasie, niezależnie w umysłach ich twórców, gdyż obieg informacji naukowej w początkach XIX wieku był bardzo ograniczony. Można sądzić, że autorzy rozwiązań, choć stworzyli nierozzerwalny łańcuch wnioskowań (centralne twierdzenie graniczne wymaga przyjęcia założenia o rozkładzie normalnym, a ten umożliwia rozwiązanie problemu propagacji błędu, która nie może się obejść bez metody najmniejszych kwadratów), to prawdopodobnie nie znali swoich prac. Ten krótki czas pomiędzy rokiem 1805 i 1810 zbudował podstawy niepewności pomiaru. Miało to miejsce w dobie romantyzmu, która to aksjologicznie w nauce kojarzy się, nie bez przyczyny, z genialną intuicją.

Paweł Fotowicz
GUM

Postępy prac przy opracowywaniu nowych dokumentów dotyczących wyrażania niepewności pomiaru

Na przestrzeni ostatnich lat (począwszy od 2005 roku) Międzynarodowe Biuro Miar (BIPM) na swoich stronach internetowych regularnie informuje o postępach prac Wspólnego Komitetu ds. Przewodników w Metrologii (Joint Committee for Guides in Metrology), dotyczących opracowywania pakietu dokumentów związanych z wyrażaniem niepewności pomiaru. Pakiet dokumentów wydawany jest pod wspólnym tytułem „Opracowanie danych pomiarowych” (Evaluation of measurement data). Pierwszym jego zwiastunem był upubliczniony w ubiegłym roku, na stronach internetowych BIPM, dokument o symbolice JCGM 101:2008 (Supplement 1 to the Guide – Propagation of distribution using a Monte Carlo method), przedstawiający zasadę propagacji rozkładów i jej realizację przy użyciu metody Monte Carlo. Dokument ten w znaczący sposób zmienia dotychczasowe podejście w dziedzinie obliczania niepewności. W związku z powyższym, dla porównania obu metod obliczeniowych, zdecydowano się na upublicznienie również treści klasycznego już dokumentu (Guide to the expression of uncertainty in measurement), wydanego jako przewodnik ISO w 1995 roku, nadając mu oznaczenie JCGM 100:2008. Dokument ten dotychczas nie był dostępny w wersji elektronicznej za pośrednictwem stron internetowych. Ponieważ podejścia w obu materiałach JCGM 101 i JCGM 100 znacznie się różnią, dlatego zdecydowano się na przeprowadzenie, w niedalekiej przyszłości, poważnych zmian w treści klasycznego dokumentu dotyczącego wyrażania niepewności pomiaru. Zmiany te są obecnie uzgadniane pomiędzy członkami JCGM.

W bieżącym roku do tych dwóch, powyższych dokumentów, dołączył trzeci o symbolice JCGM 104:2009 (An introduction to the Guide and related documents), którego celem jest przedstawienie ogólnej treści całego opracowywanego pakietu dokumentów. Zawarta jest w nim informacja o przewidywanej zawartości pozostałych opracowań, z których trzy są już w fazie ostatecznych uzgodnień pomiędzy członkami JCGM i prawdopodobnie w przyszłym roku zostaną również upublicznione na stronach internetowych BIPM. Należą do nich dokumenty: JCGM 102 (Supplement 2 to the Guide – Models with any number of output quantities), JCGM 105 (Concepts, principles and methods for the assessment of measurement uncertainty) oraz JCGM 106 (The role of measurement uncertainty in conformity assessment).

Trwają również prace, co prawda o mniejszym na razie stopniu zaawansowania, nad kolejnymi dokumentami: JCGM 103 (Supplement 3 to the Guide – Modelling) i JCGM 107 (Application of the least-squares method). Dołączył również do nich nowy projekt o nazwie „Bayesian methods”.

Do powyższego zestawienia należy jeszcze dodać aktualną, trzecią już edycję międzynarodowego słownika metrologii VIM (International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms), również upublicznią na stronach internetowych BIPM, jako dokument o symbolu JCGM 200:2008. Aż 15 terminów i definicji, przedstawionych w słowniku, związanych jest z wyrażaniem niepewności pomiaru.

Paweł Fotowicz
GUM

Informacja o książce Profesora Stanisława Adamczaka

Najnowsza praca Stanisława Adamczaka pt. „Pomiary geometryczne powierzchni”, wydana przez Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, wpisuje się w nurt współczesnej metrologii związanej z mechaniką. Dotyczy technik pomiarowych stosowanych przy kontroli powierzchni wytwarzanych części maszyn. Jest to jeden z wiodących obszarów metrologii stosowanej, znajdujących się na styku zagadnień naukowych i przemysłowych.

Książka przedstawia metody i przyrządy do badania struktury geometrycznej powierzchni elementów maszynowych ujęte w sposób kompleksowy, obejmujący pomiary parametrów ich kształtu, falistości i chropowatości. Przedstawia metody i urządzenia do pomiaru okrągłości, walcowości, prostoliniowości, płaskości czy niedomkniętych zarysów kształtu. Omawia również koncepcję modernizacji urządzeń pomiarowych poprzez połączenie przyrządu z komputerem wyposażonym w nowoczesne oprogramowanie, umożliwiające wyznaczenie mierzonych parametrów zgodnie z aktualnymi normami obowiązującymi w tym zakresie. Istotną zaletą komputeryzacji użytkowanych przyrządów pomiarowych jest eliminowanie błędów systematycznych pomiaru wynikających z niedokładności ich części mechanicznej. Realizacja komputeryzacji pomiarów wymaga sprzężenia przyrządu z komputerowym systemem przetwarzania sygnału i opracowania specjalistycznego oprogramowania. W książce przedstawiono wiele oryginalnych aplikacji stosowanych do obróbki danych pomiarowych i ich wizualizacji.

W zastosowaniach przemysłowych, szczególnie przy wytwarzaniu dużych części maszyn, istotnym zagadnieniem jest czynna kontrola obrabianych elementów, bezpośrednio na obrabiarce. Praca przedstawia koncepcję realizacji takiej kontroli, zweryfikowaną w warunkach produkcyjnych. Ma to ogromne znaczenie praktyczne i ekonomiczne, gdyż pomiary wykonywane bezpośrednio na obrabiarce umożliwiają bieżącą ocenę przebiegu procesu technologicznego i jego korektę, szczególnie przy wykonywaniu kosztownych części maszyn.

Ważnymi technikami pomiarowymi w dziedzinie metrologii wielkości geometrycznych są techniki współrzędnościowe. Omawiana praca porusza ich zastosowanie do pomiarów geometrii powierzchni wyrobów, szczególnie zarysów kształtu, a zwłaszcza powierzchni obrotowych, ich okrągłości i walcowości, przy użyciu metod stykowych i bezstykowych.

Książka przeznaczona jest dla specjalistów konstruktorów, technologów, a zwłaszcza pracowników służb kontrolno-pomiarowych przedsiębiorstw wytwarzających maszyny i urządzenia mechaniczne. Z pewnością zainteresuje też pracowników naukowo-technicznych zajmujących się budową i eksploatacją urządzeń precyzyjnych i mechatronicznych, maszynami i robotami pomiarowymi, metrologią wielkości geometrycznych czy techniką współrzędnościową.

Problematyka poruszona w omówionej książce mieści się w obszarze zdefiniowanym jako „metrologia wymiarowa dla zaawansowanych technologii produkcyjnych”, będącym jednym z kluczowych obszarów zagadnień objętych Europejskim Programem Badań Naukowych w Metrologii.

Redakcja

Wydawca: **Główny Urząd Miar**

Prezes

JANINA MARIA POPOWSKA

tel. 581 95 45, fax 620 84 11,

e-mail: prjp@gum.gov.pl

**Wiceprezes odpowiedzialny za sprawy
metrologii naukowej**

WŁODZIMIERZ POPIOŁEK

tel. 581 95 49, fax 620 84 11, e-mail: vprwp@gum.gov.pl

**Wiceprezes odpowiedzialny za sprawy
metrologii prawnej**

DOROTA HABICH

tel. 581 93 26, fax 624 25 73,

e-mail: vprdh@gum.gov.pl

Dyrektor Generalny Urzędu

ELŻBIETA SOIKA

tel. 581 93 78, fax 624 02 68, e-mail: dgu@gum.gov.pl

Redakcja: **Stanowisko ds. Koordynacji Współpracy Naukowej**

Dobrosława Sochocka tel. (22) 581 92 93, e-mail: d.suchocka@gum.gov.pl

Paweł Fotowicz tel. (22) 581 94 37, e-mail: uncert@gum.gov.pl