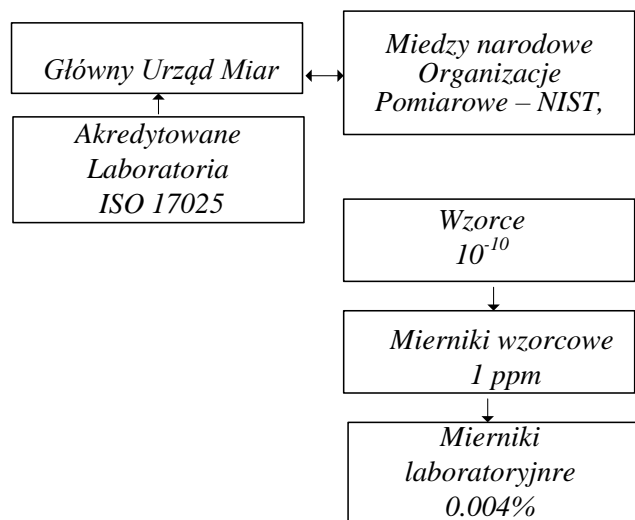


Wzorce i skalowanie przyrządów pomiarowych



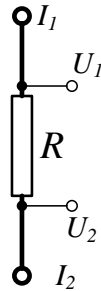
Od wzorca do miernika prowadzi ścieżka zwana „traceability of measurement” lub po polsku „spójność pomiarowa”

Jak wiadomo pomiar polega na porównaniu mierzonej wielkości z wzorcem. Nie znaczy to że w każdym przyrządzie pomiarowym jest wzorzec ale zazwyczaj wzorzec wprowadzany jest przez proces skalowania za pomocą urządzenia o większej dokładności. I tak proste przyrządy pomiarowe można skalować przy pomocy miernika laboratoryjnego który ma niepewność rzędu 0.004%. Ten z kolei przyrząd możemy skalować wykorzystując tzw. Reference multimeter o niepewności 1ppm (ppm – part per million czyli 10^{-6}). Te z kolei mierniki możemy skalować przy pomocy wzorców – obecnie dysponujemy kwantowymi wzorcami napięcia o niepewności 10^{-10} .

Do skalowania przyrządów pomiarowych uprawnione są tylko akredytowane laboratoria na podstawie normy ISO 17025 „General requirements for the competence of testing and calibration laboratories”

Materialne wzorce wielkości elektrycznych

Rys.2. Wzorzec rezystancji



Dawniej w powszechnym użyciu były wzorce materialne – przykładem może być tu popularny niegdyś wzorzec napięcia Ogniwo Westona. Wzorce te miały ograniczoną dokładność – zazwyczaj nie lepiej niż 0.01%, mogły ulegać uszkodzeniu. Dlatego dzisiaj zastępowane są przez wzorce kwantowe oparte o fundamentalne stałe fizyczne, jak stała Plancka czy ładunek elektronu. Wzorce te mają znacznie lepsze dokładności (lepiej niż 0.0001 ppm) i są praktycznie niezniszczalne.

Rys. 3. Opornik dekadowy

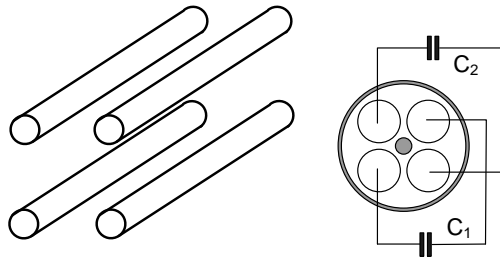


Przy mniej dokładnych pomiarach w laboratoriach wciąż używane są wzorce materialne. Przykładem może być tu opornik wzorcowy wykonany ze specjalnego materiału zwanego manganinem – rezystancja manganinu nie zmienia się z czasem i z temperaturą.

Równie popularne są też oporniki o zmiennej rezystancji, tzw. Oporniki dekadowe. Oczywiście dostępne są też indukcyjności czy pojemności wzorcowe.

Wzorce liczalne

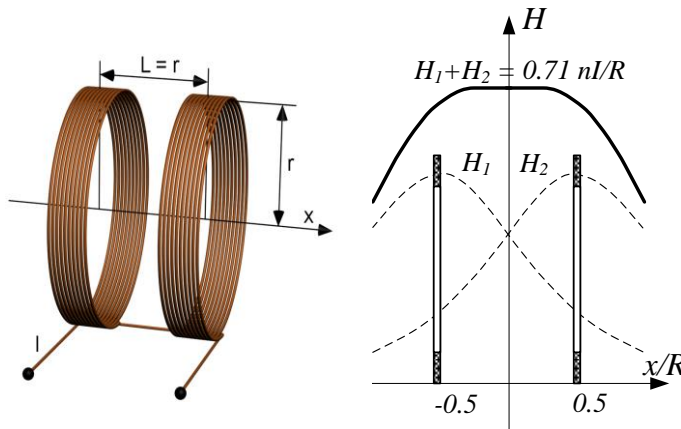
Rys.4 Kondensator Lamparda



Bardziej uniwersalne i mniej podatne na zniszczenia są tzw. wzorce liczalne, a więc takie gdzie wielkość wzorcowa opisana jest równaniem. Przykładem może być tu wzorec pojemności znany jako kondensator Lamparda - cztery pręty których pojemność jest opisana jako

$$C = \frac{\ln 2}{4\pi^2} \frac{l}{c^2} 10^7$$

Rys.5. Cewka Helmholtza



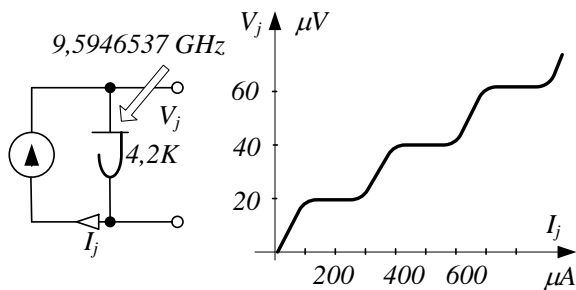
Innym przykładem może być tzw cewka Helmholtza – wzorec pola magnetycznego. Pole magnetyczne wewnątrz takiej cewki jest jednorodne i opisane wzorem

$$H = 0.7155 \frac{nI}{r}$$

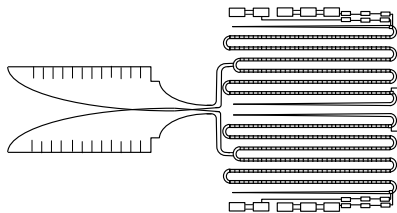
Gdzie n – liczba zwojów, r – promień cewki oraz I – prąd zasilający cewki.

Kwantowy wzorzec napięcia

Rys.6. Kwantowy wzorzec napięcia



Rys. 7. Wadą kwantowego wzorca napięcia jest stosunkowo niskie napięcie wyjściowe rzędu uV. Dlatego zazwyczaj łączy się wiele elementów szeregowo. Rysunek poniższy przedstawia komercyjnie dostępny wzorzec napięcia 10V składający się z 20 208 elementów każdy o powierzchni 18 x 38 um.



Efekt kwantowy występuje na tzw złączu Josephsona. Jest to zazwyczaj cienki pierścienek wykonany z materiału nadprzewodnikowego, najczęściej niobu umieszczony w temperaturze ciekłego helu 4.2 K. Ważnym składnikiem tego elementu są dwie bardzo wąskie szczeliny, za odkrycie których Josephson dostał nagrodę Nobla.

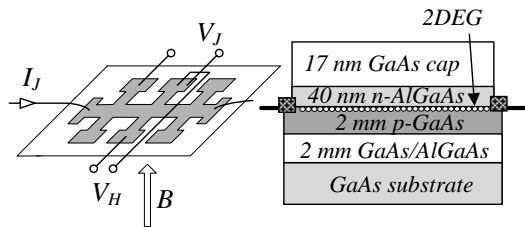
Jeśli taki element umieścimy w polu elektromagnetycznym dużej częstotliwości i zasilimy stałym napięciem to zależność $U=f(I)$ nie jest liniowa (jak w fizyce klasycznej) ale zmienia się schodkami o wartości:

$$U(n) = nf \frac{h}{2e} = \frac{nf}{K_J}$$

Gdzie: n – numer schodka, f – częstotliwość pola elektromagnetycznego, h, e – stała Plancka i ładunek elektronu. Częstotliwość umiemy mierzyć z wielką dokładnością a więc wielkość schodka zależy tylko od fundamentalnych stałych fizycznych.

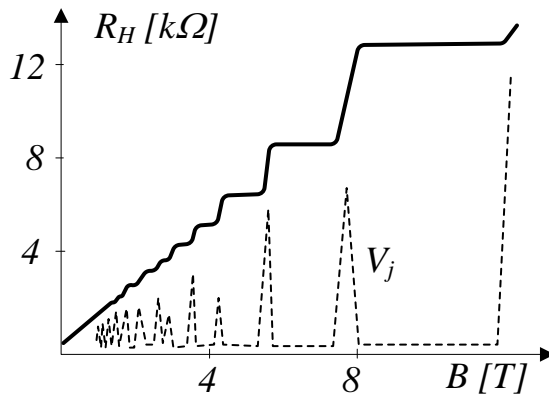
Kwantowy wzorec rezystancji

Rys.8. Hallotron w kwantowym wzorcu rezystancji



W normalnym hallotronie zasilanym prądem I napięcie wyjściowe E zmienia się liniowo z polem magnetycznym. W specjalnej strukturze hallotronu (jak na rys. 8) umieszczonej w temperaturze 1 – 2 K to napięcie zmienia się schodkowo wraz ze zmianą pola magnetycznego. A więc rezystancja rozumiana jako E/I zmienia się z polem następująco:

Rys. 9. Kwantowy efekt Halla



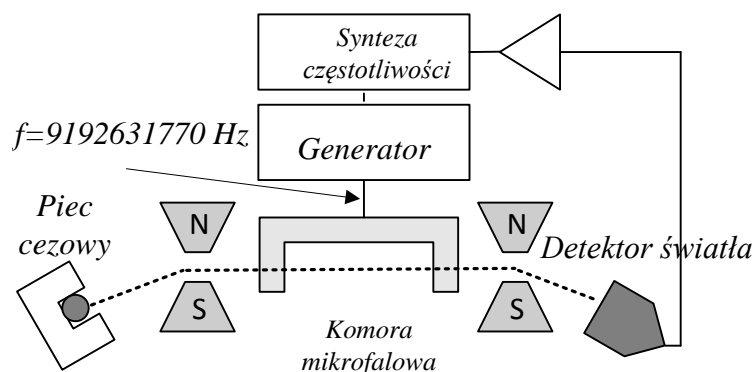
$$R_H(n) = \frac{h}{2e^2 n} = \frac{K_K}{n}$$

A więc rezystancja zależy tylko od fundamentalnych stałych fizycznych. Za odkrycie tego zjawiska von Klitzig otrzymał nagrodę Nobla.

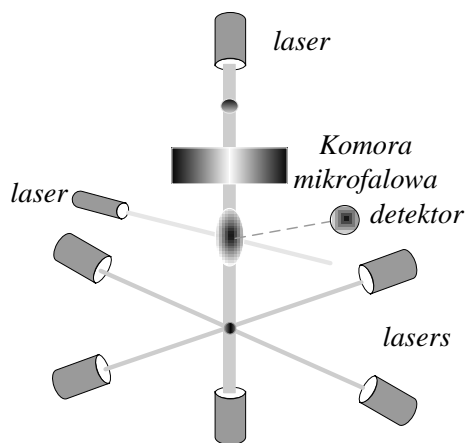
Wzorec ten jest trudniejszy do wykonania niż wzorec napięcia (niska temperatura, duże pole magnetyczne) ale np. nasz Główny Urząd Miar ma taki wzorec od kilku lat.

Wzorzec częstotliwości

Rys. 10. Wzorzec częstotliwości



Rys.11. Wzorzec fontannowy



Częstotliwość jest wielkością którą najdokładniej potrafimy określić - dostępne są wzorce o niepewności 10^{-15} - zegar oparty o taki wzorzec miałby błąd 1 sekundy na 30 mln lat.

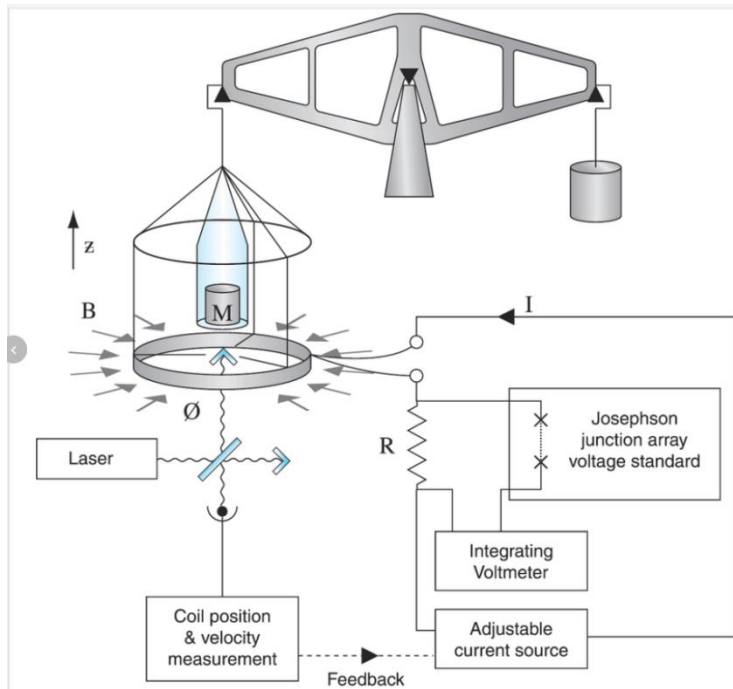
Wzorzec oparty jest na definicji sekundy w układzie SI - sekunda jest czasem trwania 9 192 631 770 okresów promieniowania cezu 133.

Światło podgrzanego do stanu świecenia cezu przechodzi przez komorę mikrofalową i pada na detektor. Sygnał detektora przestrajają generator do stanu kiedy światło jest najbardziej intensywne. Jest to wtedy gdy częstotliwość jest równa 9 192 631 770 Hz.

W najnowszej konstrukcji NIST o niepewności 10^{-16} tzw zegarze fontannowym cez podgrzewany jest do stanu świecenia przez strumień lasera. Pod wpływem włączanego i wyłączanego lasera świecąca kulka cezu wchodzi i wychodzi do komory mikrofalowej. Detektor przestrajają generator do stanu najintensywniejszego świecenia kulki.

Wzorzec masy

Rys. 12. Wzorzec masy – waga Kibbla



Masa była wielkością która najdłużej opierała się kwantyzacji. Jeszcze do zeszłego roku wzorcem masy był odważnik znajdujący się w Sevres.

Od tego roku zostaje on zastąpiony przez tzw wagę Kibbla – masa badanego odważnika równoważona jest siłą przyciągania odważnika ferromagnetycznego przez pole magnetyczne cewki.

Tak więc klasyczna wielkość mechaniczna jaka jest masa mierzona jest metodą elektryczną – miarą masy jest prąd zasilający cewkę, Oczywiście ten prąd jest określany na podstawie kwantowego wzorca napięcia i kwantowego wzorca rezystancji.

Kalibratory

Rys. 13. Kalibrator firmy Fluke



Do profesjonalnego skalowania przyrządów pomiarowych najczęściej stosowany jest przyrząd elektroniczny wytwarzający sygnały wzorcowe – zwany kalibratorem.

Taki kalibrator pobiera sygnał z miernika i przeprowadza skalowanie automatycznie.

Typowe parametry kalibratora firmy Fluke są następujące

Tabela 2.3
Dane techniczne kalibratora 5520 firmy Fluke

Parametr	Zakres	Niepewność (95% 1 rok)
Napięcie stałe	0 - ±1020 V	12 ppm
Napięcie przemiennie 10Hz – 500 kHz	1mV – 1020 V	120 ppm
Prąd stały	0 - ±20,5 A	100 ppm
Prąd przemienny 10Hz – 30 kHz	29 mA – 20,5 A	600 ppm
Rezystancja	0 – 1100 MΩ	28 ppm
Pojemność	0,19 nF – 110 mF	0,25%
Faza między dwoma przebiegami przemiennymi	0 - ± 179,99°	±0,07°
Częstotliwość	0,01 Hz – 2 MHz	25 ppm
Moc prądu stałego	10,9μW – 20,5 kW	0,023%
Moc prądu przemiennego	10,9μW- 20,5 kW	0,08%
Temperatura (modelowanie termooogniw)	-250°C - 2316°C	0,14°C
Temperatura (modelowanie termorezystorów)	-200°C - 630°C	0,03°C