

GRZEGORZ BORUTA

WPROWADZENIE DO METROLOGII

WSTĘP
JEDNOSTKI MIAR

Metrologia – nauka o pomiarach i ich zastosowaniach, dziedzina wiedzy dotycząca wszystkich zagadnień związanych z mierzeniem.

- **Metrologia naukowa** obejmuje:

- nadawanie sensu fizycznego jednostkom miar i pracami nad ich układami,
- opracowywanie, budowanie, utrzymywanie i przekazywanie (upowszechnianie) wzorców jednostek miar,
- opracowywanie skal ważniejszych wielkości fizycznych,
- opracowywanie technik pomiarów.

- **Metrologia prawna** obejmuje działania prawne (ustawodawcze, administracyjne i techniczne) władz publicznych, podejmowane w celu zapewnienia odpowiedniej jakości i wiarygodności pomiarów i wzajemnego uznawania ich wyników w sferze:

- kontroli urzędowych,
- handlu (obrotu),
- ochrony zdrowia,
- bezpieczeństwa publicznego,
- ochrony środowiska.

Metrologia jako nauka jest stosunkowo młoda – jej początki przyjmuje się na połowę XX w., choć mierzeniem człowiek zajmuje się od zarania dziejów.

Próba światowej unifikacji układów podstawowych wielkości i jednostek miar, przynajmniej w skali europejskiej, zaczęła się staraniem uczonych francuskich i brytyjskich w XVIII w. (oświecenie) i była kontynuowana przez uczonych i polityków francuskich w XIX w.

Nazwa **metrologia** (też nazwa podstawowej jednostki długości (geometrycznej, do mierzenia wymiarów przestrzennych) zaproponowanej przez Francuzów) to kalka językowa z greki, w której, upraszczając, słowo „metron” oznaczało „miarę”.

W Polsce często używa się też słowa **miernictwo**, ale raczej w sensie wiedzy o praktycznym wykonywaniu pomiarów, czyli o mierzeniu.

Uczeni i przedstawiciele rządów z różnych państw powołali w 1955 r. Międzynarodową Organizację Metrologii Prawnej (**Organisation Internationale de Métrologie Légal - OIML**, obecnie też *International Organization of Legal Metrology*).

Konwencja założycielska: ***Convention instituant une Organisation Internationale de Métrologie Légale signée à Paris, le 12 octobre 1955*** (*Convention Establishing an International Organization of Legal Metrology done at Paris - France, the 12th of october 1955*).

Obecnie (wrzesień 2024 r.) konwencję uznaje 129 państw.

64 państwa, które ratyfikowały konwencję: Albania, Algieria, Arabia Saudyjska, Australia, Austria, Belgia, Białoruś, Brazylia, Bułgaria, Chiny, Chorwacja, Cypr, Czarnogóra, Czechy, Dania, Egipt, Etiopia, Finlandia, Francja, Grecja, Hiszpania, Holandia, Indie, Indonezja, Iran, Irlandia, Izrael, Japonia, Kambodża, Kanada, Kazachstan, Kenia, Kolumbia, Korea Płn., Kuba, Macedonia Płn., Maroko, Monako, Niemcy, Norwegia, Nowa Zelandia, Pakistan, **Polska**, Portugalia, Rosja, RPA, Rumunia, Serbia, Słowacja, Słowenia, Sri Lanka, Szwajcaria, Szwecja, Tajlandia, Tanzania, Tunezja, Turcja, Ukraina, USA, Węgry, Wielka Brytania, Włochy, Wietnam, Zambia.

65 państwa uczestniczące w pracach organizacji: Angola, Argentyna, Azerbejdżan, Bahrajn, Bangladesz, Barbados, Benin, Boliwia, Bośnia i Hercegowina, Botswana, Burkina Faso, Dominikana, Dżibuti, Ekwador, Estonia, Fidżi, Filipiny, Gabon, Ghana, Gruzja, Gujana, Gwatemala, Gwinea, Hongkong, Irak, Islandia, Jordania, Katar, Kirgistan, Kiribati, Kostaryka, Kuwejt, Litwa, Luksemburg, Łotwa, Madagaskar, Malawi, Malezja, Mali, Malta, Mauritius, Meksyk, Mołdawia, Mongolia, Mozambik, Namibia, Nepal, Nigeria, Oman, Panama, Papua Nowa Gwinea, Paragwaj, Peru, Rwanda, Saint Lucia, Seszele, Sierra Leone, Singapur, Sudan, Trynidad i Tobago, Tajwan, Uganda, Zjednoczone Emiraty Arabskie, Urugwaj, Uzbekistan, przy czym grupa tych państw często się zmienia (np. w lutym 2019 r. nie było wśród nich Kirgistanu, ale były Gwinea Bissau, Niger, Senegal, Togo, Wybrzeże Kości Słoniowej).

Zadaniem OIML jest rozwiązywanie międzynarodowych problemów technicznych, administracyjnych i legislacyjnych związanych z mierzeniem, w tym proponowanie ujednolicenia i harmonizacji procedur stosowanych w metrologii prawnej w państwach sygnatariuszach konwencji OIML.

Najwyższą władzą OIML jest Międzynarodowa Konferencja Metrologii Prawnej (**Conference Internationale de Métrologie Légale - CIML**), zbierająca się co 4 lata w celu określenia ogólnej polityki metrologicznej w państwach sygnatariuszach, mającej zapewnić ustalenie i utrzymanie odpowiednich standardów przy wykonywaniu pomiarów (np. dla uzyskania spójności pomiarowej) oraz możliwość wzajemnego uznawania wyników tych pomiarów.

W celu realizacji stawianych sobie zadań OIML opracowuje i publikuje „dokumenty międzynarodowe” o charakterze ogólnym i „zalecenia międzynarodowe” będące szczegółowymi przepisami metrologicznymi. Wdrażaniem tych dokumentów i zaleceń w państwach sygnatariuszach zajmują się odpowiednie jednostki i struktury administracji rządowej.

W Polsce jest to Rada Ministrów, minister d/s gospodarki oraz Główny Urząd Miar (GUM).

1969 r.: „Słownik metrologii prawnej – terminy podstawowe” w języku francuskim (*Vocabulaire de métrologie légale – termes fondamentaux*).

1971 r.: Brytyjski Urząd Normalizacji (*British Standards Institution*) – wersja dwujęzyczna angielsko-francuska.

1978 r.: „Słownik metrologii prawnej – terminy podstawowe” druga edycja, dwujęzyczna angielsko-francuska.

2000 r.: trzecia edycja pod zmienionym tytułem „Międzynarodowy słownik pojęć metrologii prawnej” (*Vocabulaire international des termes de métrologie légale*, ang. *International vocabulary of terms in legal metrology*, skrót *VIML* przyjęto z wersji francuskojęzycznej).

najnowsza ogólnie dostępna wersja OIML V 1 Edition 2013 E/F

strona internetowa OIML, zakładka *publications – vocabularies – V 1-en/fr*

Wydanie polskojęzyczne 2015 r.: „Międzynarodowy Słownik Terminów Metrologii Prawnej” sygnowane przez GUM

strona internetowa GUM, zakładka *transfer wiedzy – publikacje – słowniki metrologiczne*
z dodatkowo podanymi nazwami definiowanych pojęć w językach dokumentu oryginalnego (angielskim i francuskim) oraz włoskim i słowackim.

Wspólny Komitet dla Przewodników Metrologicznych (*Joint Committee for Guides in Metrology* (JCGM)) siedmiu międzynarodowych organizacji zajmujących się m.in. standaryzacją:

- *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM),
- *Organisation Internationale de Métrologie Légale* (OIML),
- *International Organization for Standardization* (ISO),
- *International Electrotechnical Commission* (IEC),
- *International Union of Pure and Applied Physics* (IUPAP),
- *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC),
- *International Federation of Clinical Chemistry* (IFCC).

1984 r., 1993 r.: „Międzynarodowy słownik pojęć podstawowych i ogólnych metrologii”, fr. *Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie*, ang. *International vocabulary of basic and general terms in metrology*, skrót – VIM (nie mylić z VIML) przyjęto z wersji francuskojęzycznej.

2007 r.: „Międzynarodowy słownik metrologii – pojęcia podstawowe i ogólne oraz terminy z nimi związane”, fr. *Vocabulaire international de métrologie – concepts fondamentaux et généraux et termes associés* (VIM), ang. *International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms* (VIM).

najnowsza ogólnie dostępna wersja z 2012 r. (wersja z 2010 r. z małymi zmianami)

strona internetowa OIML, zakładka *publications – vocabularies – V 2-200-en*

strona internetowa BIPM, zakładka *publications/réunions – guides en métrologie, publications & events – guides in metrology,*

strona internetowa <https://www.iso.org/iso-guides.html>, zakładka *publicly available iso/iec guides.*

Wydanie polskojęzyczne 1996 r.: „Międzynarodowy słownik podstawowych i ogólnych terminów metrologii” sygnowane przez GUM.

Płatne:

PN-61/N-02050, Metrologia. Nazwy i określenia. (wycofana)

PN-71/N-02050, Metrologia. Nazwy i określenia. (wycofana)

PKN – ISO/IEC Guide 99:2010, Międzynarodowy słownik metrologii – Pojęcia podstawowe i ogólne oraz terminy z nimi związane (VIM). (obowiązująca)

Pomiar – empiryczny proces obiektywnego przyporządkowania liczb właściwościom obiektów (ciał, przedmiotów) i zdarzeń świata realnego w sposób umożliwiający opisanie tych obiektów i zdarzeń.

Liczba – wynik pomiaru „zawiera” informację o mierzonej właściwości.

Empiryczny (doświadczalny, eksperymentalny, subiektywny) charakter pomiaru –
– **wynik pomiaru musi być efektem obserwacji, a nie wymyślenia.**

Obiektywność pomiaru – w granicach błędu (niepewności) **liczby przyporządkowywane właściwościom obiektów i zdarzeń muszą być niezależne od obserwatora (mierniczego).**

Błąd (niepewność) wyniku pomiaru wynika z **realnie subiektywnej próby uzyskania wyniku obiektywnego** (eksperymentu wykonanego przez mierniczego).

Pomiar – proces uniwersalny i szeroko rozpowszechniony.

Pomiar pewnych właściwości fizycznych jest intuicyjnie oczywisty – od dziecka uczymy się mierzenia długości, masy, ciężaru (przejawu masy w polu grawitacyjnym), powierzchni, objętości, czasu, temperatury.

Istnieją właściwości, które trudno mierzyć, np. twardość, smarowalność (np. masła), zginalność (np. papieru), zwartość (np. sterty węgla) – są to bardzo ważne właściwości charakteryzujące podatność substancji na obróbkę za pomocą narzędzi.

Nauki społeczne i biologiczne stwarzają jeszcze większe problemy przy tworzeniu skal pomiarowych. Trudno mierzyć smak, zapach, inteligencję, obłąd, poziom konfliktu w grupie, poziom życia w społeczeństwie.

Pomiar jest podstawową metodą naukowego poznawania świata.

Pomiar – przyporządkowanie liczb właściwościom obiektów i zdarzeń.

Opis **właściwości** obiektów i zdarzeń, a nie samych obiektów i zdarzeń. Daną właściwość ma wiele obiektów i zdarzeń.

Mierzy się nie obiekt, ale jego długość, masę/ciężar, temperaturę itd.

Zakłada się istnienie **jednoznacznego pojęcia mierzonej właściwości** jako **abstrakcyjnej cechy całej klasy obiektów i zdarzeń**, której indywidualne przypadki (przejawy lub wartości) są przedmiotem pomiaru.

Zakłada się istnienie **liczb jednoznacznie przyporządkowanych danym wartościom** badanej właściwości (wielkości), przy czym różnym wartościom badanej właściwości za pomocą tego samego procesu pomiarowego przyporządkowywane są różne liczby.

Liczbowe relacje pomiędzy liczbami – wynikami pomiarów – wynikają z empirycznych relacji między wartościami badanej właściwości.

Dany empiryczny porządek obiektów pod względem badanej właściwości wywołuje odpowiedni porządek liczb – wyników pomiarów.

Jeżeli badane właściwości badanych obiektów (różnych lub tego samego w innym czasie) są takie same (nierozróżnialne), to liczby – wyniki pomiarów – są równe.

Jeżeli istnieje empiryczna relacja, która odpowiednio porządkuje obiekty pod względem badanej właściwości, to liczby – wyniki pomiarów – można uporządkować wg relacji większości.

Wniosek: pomiar polega na **porównaniu badanego przejawu** (wartości) danej właściwości obiektu (wielkości) **z innymi przejawami** tej samej właściwości innego obiektu przyjętego za **obiekt odniesienia**.

Mówi się nawet, że **liczba – wynik pomiaru** danej właściwości – wyraża się **stosunkiem badanego przejawu** (wartości) tej właściwości **do ustalonej wartości wzorcowej** tej właściwości, ustalonej i przyjętej za tzw. **jednostkę miary**.

można porównać długość dowolnego przedmiotu np. do materialnego wzorca 1 m

nie można porównywać temperatury do wzorca 1 °C, bo go nie ma (określa się tylko liczby stopni temperatury dla określonych jej wartości w tzw. międzynarodowej skali temperatury, np. ile stopni ma temperatura punktu potrójnego wody)

nie można porównywać inteligencji człowieka do inteligencji człowieka, którego inteligencję przyjęto za jednostkową

$\omega \in \Omega$ – obiekty fizyczne (egzemplarze), procesy, zdarzenia danej klasy Ω
(np. ołówki należące do zbioru wszystkich ołówków świata)

$\mathcal{L}$ – właściwość obiektu – długość, ciężar, temperatura, lepkość, ... (np. ołówka)

$q \in Q$ – przejawy (wartości, którym pomiary przypisują liczby) właściwości $\mathcal{L}$ (np. długości ołówków)

Przejawów q może być wiele, a nawet nieskończenie wiele, i tworzą one zbiór Q
(na świecie jest dużo różnych ołówków, każdy ma jakąś długość).

Skala pomiarowa opiera się na:

- ustanowionym dla przejawów (wartości) $q \in Q$ empirycznym porządku „ $\prec$ ”,
- operacji łączenia „ $\oplus$ ” (addytywności) przejawów, formalne o właściwościach dodawania.

Dla relacji porządku „ $\prec$ ” musi być określona relacja równoważności „ $\sim$ ” dla obiektów nierozróżnialnych ze względu na przejaw (wartość) badanej właściwości.

Łączenie obiektów ω_1 i $\omega_2 \in \Omega$ o przejawach (wartościach) odpowiednio q_1 i $q_2 \in Q$ danej właściwości $\mathcal{L}$ prowadzi do powstania nowego obiektu $\omega_3 \in \Omega$ posiadającego przejaw (wartość) q_3 tej właściwości $\mathcal{L}$ też należący do Q , przy czym:

$$q_1 \oplus q_2 \in Q$$

$$q_1 \oplus q_2 \sim q_2 \oplus q_1$$

$$q_1 \oplus (q_2 \oplus q_3) \sim (q_1 \oplus q_2) \oplus q_3$$

$$q_1 \prec q_2 \Rightarrow q_1 \oplus q_3 \prec q_2 \oplus q_3$$

$$(q_1 \sim q_2 \sim q_3 \sim \dots \sim q_n \text{ oraz } q_1 \prec q^0) \Rightarrow \exists n : q^0 \prec q_1 \oplus q_2 \oplus q_3 \oplus \dots \oplus q_n$$

(warunek Archimedes: jeżeli obiekt A jest większy od obiektu B, to złożenie pewnej liczby mniejszych obiektów B da nowy element C większy od obiektu A)

Zbiór $\{Q, \sim, \prec, \oplus\}$ spełniający te postulaty ma właściwości formalne takie same jak liczbowy system relacyjny $\{\mathcal{R}, =, <, +\}$.

Bezpośrednia skala pomiarowa jest konstruowana następująco:

- pojedynczy obiekt (zdarzenie) ω_1 o przejawie q_1 właściwości $\mathcal{L}$ wybiera się jako **wzorzec** wartości tej właściwości i przyporządkowuje się mu **liczbę 1 – q_1 wybiera się jako jednostkę bezpośredniej skali pomiarowej (jednostkę miary)**,
- konstruuje się (lub znajduje spośród już istniejących) inny obiekt (zdarzenie) ω_1' o przejawie $q_1' \sim q_1$ właściwości $\mathcal{L}$ i przyporządkowuje mu **liczbę 1**,
- łącząc dwa takie obiekty (zdarzenia) otrzymuje się nowy obiekt (zdarzenie) $\omega_2 \sim \omega_1 \oplus \omega_1'$ o przejawie $q_2 \sim q_1 \oplus q_1'$ właściwości $\mathcal{L}$ i przyporządkowuje mu **liczbę 2**,
- łącząc obiekty (zdarzenia) ω_1 i ω_2 otrzymuje się nowy obiekt (zdarzenie) $\omega_3 \sim \omega_1 \oplus \omega_2$ o przejawie $q_3 \sim q_1 \oplus q_2$ właściwości $\mathcal{L}$ i przyporządkowuje mu **liczbę 3**, itd.,
- wzorce ułamków właściwości $\mathcal{L}$ obiektów (zdarzeń) otrzymuje się konstruując (lub znajdując spośród już istniejących) inne obiekty (zdarzenia) o przejawach właściwości $\mathcal{L}$ takich, że $q_1 \sim q_{\frac{1}{2}} \oplus q_{\frac{1}{2}} \sim q_{\frac{1}{3}} \oplus q_{\frac{1}{3}} \oplus q_{\frac{1}{3}} \sim q_{\frac{1}{4}} \oplus q_{\frac{1}{4}} \oplus q_{\frac{1}{4}} \oplus q_{\frac{1}{4}} \sim \dots$; wtedy:

obiektowi (zdarzeniu) $\omega_{\frac{1}{2}}$ o przejawie $q_{\frac{1}{2}}$ właściwości $\mathcal{L}$ przyporządkowuje się liczbę $\frac{1}{2}$,

obiektowi (zdarzeniu) $\omega_{\frac{1}{3}}$ o przejawie $q_{\frac{1}{3}}$ właściwości $\mathcal{L}$ przyporządkowuje się liczbę $\frac{1}{3}$,

obiektowi (zdarzeniu) $\omega_{\frac{1}{4}}$ o przejawie $q_{\frac{1}{4}}$ właściwości $\mathcal{L}$ przyporządkowuje się liczbę $\frac{1}{4}$, itd.

Otrzymuje się zbiór obiektów (zdarzeń) – wzorców $\left\{ ..., \omega_{\frac{1}{4}}, \omega_{\frac{1}{3}}, \omega_{\frac{1}{2}}, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, ... \right\}$
o przejawach (wartościach) $\left\{ ..., q_{\frac{1}{4}}, q_{\frac{1}{3}}, q_{\frac{1}{2}}, q_1, q_2, q_3, q_4, ... \right\}$ właściwości $\mathcal{L}$
i przyporządkowanych im liczbach $\left\{ ..., \frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1, 2, 3, 4, ... \right\}$.

Pomiar właściwości $\mathcal{L}$ dowolnego innego obiektu (zdarzenia) ω o przejawie q
odbywa się przez znalezienie obiektu (zdarzenia) ω_i o przejawie $q_i \sim q$ właściwości $\mathcal{L}$,
a jako liczbę – wynik pomiaru wartości właściwości $\mathcal{L}$ obiektu (zdarzenia) ω – przyjmuje się
liczbę i przyporządkowaną obiektowi – wzorcowi ω_i .

Pośrednie skale pomiarowe właściwości obiektów i zdarzeń są konstruowane **przez związki danej właściwości z innymi właściwościami o już zdefiniowanych skalach pomiarowych**.

Jest to powodowane np. niemożliwością ustalenia bezpośredniej skali pomiarowej o cechach addytywności.

Nie można określić bezpośredniej skali pomiarowej np. lepkości czy gęstości, ponieważ nie istnieją addytywne operacje łączenia wartości tych właściwości.

Inny powód konstruowania pośrednich skal pomiarowych – dążenie do utworzenia logicznego systemu wszystkich skal pomiarowych, składającego się z **możliwie mniej** liczby skal określonych bezpośrednio (skal podstawowych) i dużej liczby skal określonych pośrednio.

Zwykle definicja pośredniej skali pomiarowej dla właściwości $\mathcal{L}$ jest przyjmowana jako definicja tej właściwości (znana choćby z kursu fizyki).

Przykład: relacja gęstości ρ , masy m i objętości V bryły materiału jednorodnego: $\rho = \frac{m}{V}$.

Dysponując skalami pomiarowymi masy i objętości można, przez powiązanie ich związkiem empirycznym $\frac{m}{V}$, skonstruować skalę pomiarową gęstości ciał jednorodnych.

Wielkości (fizyczne) – właściwości (cechy) obiektów (ciał, substancji) lub zjawisk charakteryzujące te obiekty lub zjawiska w sensie jakościowym i ilościowym (można je porównywać jakościowo i ilościowo z takimi samymi właściwościami innych obiektów lub zjawisk).

Wielkość ogólnie to np. długość, czas, masa, praca, siła, temperatura, ...

Nazwy wielkości zastępuje się symbolami (literami łacińskimi lub greckimi) pisanymi kursywą: długość – l, d, r, x itd., masa – m , czas – t , temperatura – T , częstotliwość – f , siła – F ,
gęstość – ρ , prąd elektryczny – I, i , przenikalność magnetyczna – μ ...

Wielkość określona to wielkość przypisana do określonego egzemplarza obiektu lub zjawiska np. długość pewnego pręta, czas przejazdu określonej drogi, masa pewnego odważnika, ...

Wielkości podstawowe – w danym układzie wielkości są przyjmowane za niezależne od siebie i przy ich użyciu wzorami definiującymi wyraża się wielkości pochodne. (np. w układzie SI: długość, masa, czas, natężenie prądu elektrycznego, temperatura termodynamiczna, światłość źródła światła i ilość substancji)

Wielkości pochodne – wielkości określone w danym układzie wielkości jako funkcje wielkości podstawowych (np. wymienione powyżej częstotliwość, siła, gęstość).

Wartość wielkości – określony stan (przejaw, realizacja) tej wielkości określonej.

Formalnie wartość wielkości określonej x jest to iloczyn liczby X i jednostki miary $[x]$.

Jednostka miary – przejaw (wartość, realizacja) danej wielkości, której **wartość liczbowa przyjęto umownie za równą 1**.

Jednostkę miary danej wielkości ustala się w celu umożliwienia ilościowego porównywania ze sobą różnych wartości tej samej wielkości, a więc i samych wielkości oraz obiektów lub zdarzeń.

Zapis $x = X [x]$ oznacza, że wielkość określona x ma wartość będącą X -krotnością wartości $[x]$.

Przy zmianie jednostki miary z $[x]$ na $[x']$ wartość wielkości określonej x nie ulegnie zmianie, choć zmieni się liczba jednostek z X na X' : $x = X [x] = X' [x']$ oraz $\frac{X}{X'} = \frac{[x']}{[x]}$.

Im większa jest jednostka miary,
tym mniejsza jest liczba tych jednostek określająca daną wartość wielkości.

Pomiar – czynność doświadczalna mająca na celu wyznaczenie wartości mierzonej wielkości, wyrażonej iloczynem liczby i jednostki miary.

Jednostki miar, podobnie jak wielkości fizyczne, dzieli się na jednostki:

- **podstawowe (elementarne)** – jednostki miary wielkości podstawowych w danym układzie wielkości fizycznych,
- **pochodne** – jednostki miary wielkości pochodnych w danym układzie wielkości fizycznych.

Układ jednostek miar – uporządkowany zbiór podstawowych i pochodnych jednostek miar odnoszący się do określonego układu podstawowych i pochodnych wielkości fizycznych. Składa się on z **podstawowych jednostek miar, przyjętych umownie** (zwykle w liczbie kilku – układ SI ma ich 7), oraz ze zbudowanych na ich podstawie **pochodnych jednostek miar**.

Powstawanie układów jednostek miar wiąże się z ustaleniem wzorców jednostek miar (**etalonów**) różnych wielkości fizycznych.

Wzorce, **brane z przyrody** lub **przyjęte umownie i wykonane**, umożliwiają przeprowadzanie pomiarów (poprzez porównywanie z nimi wartości badanych wielkości).

Dla każdej wielkości można **w zasadzie przyjąć dowolną jej wartość za jednostkę miary**. Doprowadziło do powstania całego szeregu układów jednostek miar. Najbardziej znane w tzw. technicznej kulturze zachodniej to:

- MKS (metr, kilogram, sekunda),
- MKSA (metr, kilogram, sekunda, amper),
- SI (*Le Systeme International d'Unites*),
- CGS (centymetr, gram, sekunda),
- MTS (metr, tona, sekunda),
- MkGS (techniczny; metr, kilogram-siła, sekunda),
- anglosaski masowy – stopa, funt, sekunda,
- anglosaski ciężarowy – stopa, funt-siła, sekunda.

Układy metryczne – układy, w których jednostką długości jest metr lub jego dziesiętne krotności, np. MKS, CGS, MkGS, SI.

Układy masowe – układy, w których wielkością podstawową jest masa, np. CGS, MKS, SI.

Układy ciężarowe – układy, w których wielkością podstawową jest ciężar, np. MkGS.

Obowiązywanie danego układu jednostek w danym państwie jest zwykle prawnie sformalizowane przez umowy międzypaństwowe, przez ustawy parlamentarne czy edykty osób panujących lub przez rozporządzenia administracyjne.

W Polsce legalnym układem jednostek miar jest układ SI.

Definicje i wzorce jednostek miar tego układu są elementem polskiego systemu prawnego, a nie tylko elementem nauk przyrodniczych.

Wszystkie podstawowe jednostki miar mają swoje nazwy własne (np. w SI: metr, kilogram, sekunda, amper, kelwin, kandela i mol).

Z pośród jednostek pochodnych tylko niektóre mają swoje nazwy (np. w SI: radian, herc, niuton, dżul, wat, paskal, kulomb, wolt, om, farad, henr, tesla, weber, lumen, luks, bekerel), dla innych stosuje się słowa zbitki nazw innych jednostek (np. w SI jednostką momentu siły jest niutonometr, a prędkości metr na sekundę).

Nazwy jednostek pisze się małą literą, niezależnie czy pochodzą od nazwisk czy nie.

W Polsce nazwy jednostek pisze się tak, jak się je wymawia

(jednostką siły jest niuton a nie newton, jednostką energii jest dżul a nie joule;
newton i joule są nazwami tych jednostek w języku angielskim)

i odmienia przez przypadki (stosuje końcówki fleksyjne).

W celu skrócenia zapisu zamiast nazw jednostek miar stosuje się ich symbole pisane czcionką prostą (np. w SI symbolem metra jest m, symbolem kilograma jest kg, symbolem sekundy jest s, symbolem wolta jest V, symbolem niutona jest N).

Symbole jednostek o nazwach pochodzących od nazwisk pisze się wielką literą, pozostałych małą (np. A, V, S, Hz, J, N, Pa, W, Wb, Bq, m, s, kg, lx, mol, cd), znakami łacińskimi, z wyjątkiem symbolu oma, dla którego przyjęła się wielka grecka Ω .

Wymiar wielkości – wyrażenie przedstawiające iloczyn wymiarów wielkości podstawowych w określonych potęgach ze współczynnikiem liczbowym przyjętym jako 1.

Niech będą 4 wielkości podstawowe, np. długość l , masa m , czas t , prąd elektryczny i
o wymiarach oznaczonych symbolami L, M, T, I.

Wtedy dowolna wielkość pochodna ma wymiar o postaci iloczynu: $\dim x = 1 \cdot L^\alpha \cdot M^\beta \cdot T^\gamma \cdot I^\delta$
– jest to **wzór wymiarowy**.

Wykładniki $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ itd. to **wykładniki wymiarowe**.

Np. wymiarem prędkości v w układzie wielkości l, m, t, I jest:

$$\dim v = L^1 \cdot M^0 \cdot T^{-1} \cdot I^0 = L^1 \cdot T^{-1} = \frac{L}{T}$$

W ogólności wymiarami nie są podstawowe jednostki miar – wymiar prędkości to iloraz wymiarów drogi i czasu, a nie metra i sekundy (SI), centymetra i sekundy (CGS) czy stopy i sekundy (układ anglosaski).

Każda wielkość pochodna może mieć tylko jeden wzór wymiarowy przy zadanym układzie wielkości podstawowych.

Rozróżnia się trzy rodzaje wzorów fizycznych:

1. **równania wielkościowe** – symbole literowe przedstawiają wielkości fizyczne – równania te są ważne (prawdziwe) niezależnie od przyjętego układu jednostek miar i nie wymagają jednostek miar z góry określonych

$$\text{prędkość} = \frac{\text{droga}}{\text{czas}} \leftrightarrow v = \frac{s}{t} \quad \text{- określa wzór wymiarowy prędkości w SI (s i t są wielkościami podstawowymi)}$$

$$\text{objętość kuli} = \frac{4}{3} \pi \text{promień}^3 \leftrightarrow V_k = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad \text{- nie określa wzoru wymiarowego objętości kuli w SI bo zawiera ułamek 4/3 i stałą } \pi \text{ (r jest wielkością podstawową, ale } \frac{4}{3} \pi \neq 1)$$

$$\text{siła} = \text{masa} \cdot \text{przyspieszenie} \leftrightarrow F = ma \quad \text{- nie określa wzoru wymiarowego siły w SI (m jest, a nie jest wielkością podstawową),}$$

$$\text{siła} = \frac{\text{masa} \cdot \text{droga}}{\text{czas}^2} \leftrightarrow F = \frac{ms}{t^2} \quad \text{- określa wzór wymiarowy siły w SI (m, s i t są wielkościami podstawowymi)}$$

2. **równania wartości liczbowych** – symbole literowe przedstawiają wartości liczbowe wielkości fizycznych odpowiadające zastosowanym jednostkom miar

$v = \frac{\pi d n}{6000}$ - prędkość liniowa po okręgu wyrażona w $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ jeżeli średnica okręgu d jest mierzona w cm, a prędkość kątowna (obrotowa) n w $\frac{1}{\text{min}} \left(\frac{\text{obr}}{\text{min}} \right)$ (równanie to zawiera dwa współczynniki liczbowe: ułamek $1/6000$ i stałą π i jest prawdziwe tylko dla jednostek miar przytoczonych w jego omówieniu)

3. równania jednostek miar – symbole literowe przedstawiają jednostki miar, stosuje się je w celu:

- określenia pochodnych jednostek miar w danym układzie jednostek miar poprzez podstawowe jednostki miar lub inne pochodne jednostki miar, np.:

$$1 \text{ m}^2 = (1 \text{ m})(1 \text{ m}), 1 \text{ W} = (1 \text{ V})(1 \text{ A}), 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = (1 \text{ m})(1 \text{ s}^{-1}),$$

- ustalenia zależności między jednostką miary a jej wielokrotnością lub podwielokrotnością, np.: $1 \text{ mm} = 0,001 \text{ m}$, $1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$, $1 \text{ kHz} = 1000 \text{ Hz}$,
- wyznaczenia równoważności pomiędzy jednostkami miar tej samej wielkości fizycznej w różnych układach jednostek miar, np.: jeden kilogram-siła

$$1 \text{ kG} = (1 \text{ kg})(1 \text{ g}) = (1 \text{ kg})(9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}) = 9,80665 \frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{s}^2} = 9,80665 \text{ N (niutona)}$$

Równania jednostek miar mają postać bardzo podobną do wzorów wymiarowych:

$$[x_{n+1}] = K \cdot [x_1]^{a_1} \cdot [x_2]^{a_2} \cdot [x_3]^{a_3} \cdot \dots \cdot [x_n]^{a_n}, \quad K \text{ i } a_i - \text{ustalone liczby.}$$

Jednostka $[x_{n+1}]$ nazywa się **jednostką spójną** gdy $K = 1$ i $[x_i]$ są jednostkami podstawowymi.

Spójny układ jednostek miar – układ jednostek miar składający się ze spójnych jednostek miar, przy czym dopuszcza się przypadki zależności między jednostkami, w których współczynnik liczbowy K ma wartość stałych matematycznych (np. π , e).

W danym **układzie jednostek miar** wielkości tego samego rodzaju – **wielkości jednorodne** – wyraża się w tych samych jednostkach miar.

Np. praca, energia i ciepło w układzie SI są wyrażane w dżulach o wzorze $J = \frac{\text{m}^2 \cdot \text{kg}}{\text{s}^2}$.

Wielkości wyrażone w tych samych jednostkach miar nie muszą być jednorodne – są to **wielkości homologiczne**.

Np. moment siły i praca w układzie SI są wyrażane jako: $N \cdot m = \frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} = \frac{\text{m}^2 \cdot \text{kg}}{\text{s}^2}$
i $J = \frac{\text{m}^2 \cdot \text{kg}}{\text{s}^2}$.

Pewne wielkości są **bezwymiarowe (niemianowane)**, np. sprawność. Są one ilorazami dwóch wielkości jednorodnych lub homologicznych. Bezwymiarowe są też liczby sztuk obiektów (np. atomów) lub zjawisk (np. pełnych obrotów).

Wielkość bezwymiarową wyraża się za pomocą iloczynu wielkości podstawowych układu jednostek miar w potęgach zerowych (formalnie jednostką miary jest liczba 1, zwykle nie pisana).

Pierwotnie jednostki miar były określone przeważnie jako wielkości naturalne, których wybór miał charakter przypadkowy, a niekiedy nawet anegdotyczny:

- Karol Wielki (742-814), król Franków i Cesarz Rzymski ustanowił „stopę królewską” równą długości swojej stopy,
- Edward I (1239-1307), król Anglii, ustanowił:
 - „jard” równy odległości od swojego nosa do końca wyciągniętej ręki,
 - „cal” równy długości trzech ziaren jęczmienia, suchych i okrągłych, przylegających do siebie końcami; miał on mniej więcej długość szerokości kciuka (gdy nie było pod ręką ziaren jęczmienia),
 - „akr” równy powierzchni pola jaką para wołów może zaorać w ciągu dnia (w krajach związanych z kulturą niemiecką była to „morga”),
- piędź miała długość odległości od końców kciuka i małego palca rozwartej dłoni dorosłego mężczyzny,
- łokieć miał długość przedramienia dorosłego mężczyzny,
- dzban i garniec miały objętość odpowiednich naczyń,
- doba to czas kolejnych dnia i nocy,
- miesiąc to czas cyklu widoczności Księżyca,
- rok to czas pełnego cyklu kolejnych pór roku lub czas między kolejnymi dniami o tej samej długości w fazie ich przyrostu lub ubywania.

Często jednostki tych samych wielkości, mimo wspólnych nazw, różniły się znacznie.

W końcu XVIII w. w Europie funkcjonowało:

- ok. 100 różnych łokci (o długości od 47 do 78 cm),
- ok. 50 różnych mil,
- ok. 120 różnych funtów.

Uwzględniając jednostki wielokrotne i podwielokrotne, często nie tworzące systemów dziesiętnych, a nawet tak samo krotnych

1 jard = 3 stopy, a 1 stopa = 12 cali (krotności 3 i 12)

1 cetnar angielski = 112 funtów, a 1 funt = 16 uncji (krotności 112 i 16)

występowała sytuacja dość mocno przeszkadzająca w rozwoju przemysłu i międzynarodowego handlu, a trzeba pamiętać, że były to czasy rewolucji technicznej, związanej z wykorzystaniem maszyny parowej, i rozpoczęcia masowej przemysłowej produkcji niektórych towarów.

Druga połowa XVIII w.: postulaty (głównie uczonych francuskich) ujednolicenia jednostek miar stosowanych w Europie i w kolonizowanych przez Europejczyków rejonach świata, nie zakończone przyjęciem takich jednostek nawet w Królestwie Francji.

Wielka Rewolucja Francuska, 1790 r.: rząd Republiki Francuskiej zleca Francuskiej Akademii Nauk opracowanie jednolitego systemu miar i wag. Uczni francuscy zdecydowali, że system ten powinien **bazować na zjawiskach naturalnych**, a nie antropologicznych.

Opracowany system jednostek miar miał następujące jednostki podstawowe:

- **metr** do wyrażania długości – $\frac{1}{10\,000\,000}$ ćwiartki południka ziemskiego (odległości od bieguna do równika) przechodzącego przez Paryż; wzorzec sporządzono w postaci odpowiednio długiej platynowej sztaby,
- **gram** do wyrażania masy – masa 1 cm^3 czystej wody w temperaturze $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (w tej temperaturze woda ma największą gęstość) i przy ciśnieniu 760 mmHg (przeciętne ciśnienie atmosferyczne); wzorcem był 1 liter = $1000\text{ cm}^3 = 1\text{ dm}^3$ takiej wody (stąd niejako naturalnie zaczęto operować kilogramem – tysiącem gramów – jako jednostką masy), z przyczyn praktycznych sporządzono stały wzorzec w postaci odpowiednio masywnego platynowego odważnika,
- **sekunda** do wyrażania czasu – $\frac{1}{86\,400}$ średniej doby słonecznej (mianownik wziął się z przeliczenia doby na sekundy: 1 doba = $(24\text{ h})(60\text{ min})(60\text{ s}) = 86400\text{ s}$).

Wszystkie inne jednostki były pochodnymi tych trzech, a ich wielokrotności i podwielokrotności były tworzone jako potęgi liczby 10. Wprowadzone wtedy nazwy tych wielokrotności i podwielokrotności (decy, centy, mili, ..., deka, hekto, kilo, ...) są używane i dzisiaj.

Propozycje te przyjęto i w 1795 r. wprowadzono we Francji metryczny, masowy, dziesiętny system miar, nazwany układem **MKS** (metr – kilogram – sekunda).

1875 r.: przyjęcie systemu metrycznego przez 17 narodów (w tekście z internetowej strony **BIPM (Bureau International des Poids et Mesures** – Międzynarodowe Biuro Wag i Miar, w polskiej nomenklaturze tylko Miar) jest „nations” a nie „countries”, „goverments” czy „kingdoms”), poprzez podpisanie tzw. **Konwencji Metrycznej**, będącej wyrazem „*pragnienia zapewnienia ujednostajnienia międzynarodowego i udoskonalenia systemu metrycznego*” (otrzymywania takich samych wyników pomiarów, w granicach wyznaczonych ich niepewności, niezależnie od miejsca i czasu ich wykonania, szczególnie ważnego w przemyśle i międzynarodowym handlu).

W Konwencji tej zobowiązano się do założenia i wspólnego utrzymywania Międzynarodowego Biura Miar z siedzibą w Paryżu (ostatecznie wybrano Pavillon de Breteuil w Sevres w aglomeracji Paryża), którego zadaniem było przechowywanie, konserwacja, rozpowszechnianie, porównywanie i sprawdzanie wzorców jednostek miar (a w zasadzie tylko metra i kilograma) międzynarodowych i państwowych, też z wzorcami jednostek niemetrycznych używanych w różnych krajach i naukach.

Biuro to, o charakterze naukowym i stałym, działa pod kierownictwem Międzynarodowego Komitetu Miar (**Comite International des Poids et Mesures - CIPM**), podlegającego z kolei Generalnej Konferencji Miar (**Conference Generale des Poids et Mesures - CGPM**) odbywanej nie rzadziej niż co 6 lat, w której uczestniczą przedstawiciele (delegaci) rządów wszystkich państw-stron Konwencji.

„Konwencja dotycząca utworzenia i utrzymania Międzynarodowego Biura Miar, wraz z regulaminem,
podpisana w Paryżu dnia 20 maja 1875 r.” (Konwencja Metryczna)

l.p.	podpisana przez przedstawicieli	uwagi
1	Króla Belgów	kolonie w Afryce
2	Cesarza Niemieckiego	II Rzesza: 22 państwa: 4 królestwa (Prusy (zaborca Polski), Bawaria, Wirtembergia i Saksonia) 6 Wielkich Księstw (Badenia, Hesja, Meklemburgia, ...) 12 Księstw (Brunszwik, Anhalt, ...), 3 wolne miasta (Hamburg, Lubeka i Brema) 1 terytorium Rzeszy (Alzacja i Lotaryngia) kolonie w Afryce, Azji i Oceanii
3	Cesarza Austriacko-Węgierskiego	zaborca Polski , poddanymi byli m. in. Austriacy, Węgrzy, Czesi, Polacy, Słowacy, Słoweńcy, Chorwaci, Serbowie, ...
4	Cesarza Brazylijskiego	
5	Prezydenta Konfederacji Argentyńskiej	
6	Króla Duńskiego	
7	Króla Hiszpańskiego	kolonie w Ameryce, Afryce i Azji
8	Prezydenta Stanów Zjednoczonych Ameryki	
9	Prezydenta Republiki Francuskiej	III Republika, kolonie w Afryce, Ameryce i Azji
10	Króla Włoskiego	już po zjednoczeniu ze stolicą w Rzymie, z koloniami w Afryce
11	Prezydenta Republiki Peruwiańskiej	do dziś nie ratyfikowało Konwencji
12	Króla Portugalskiego i Algarwejskiego	kolonie w Afryce i Azji
13	Cesarza Wszechrosyjskiego	zaborca Polski , ekspansja na Kaukaz, Syberię i Azję środkową
14	Króla Szwedzkiego i Norweskiego	dwa państwa ze wspólnym królem
15	Prezydenta Konfederacji Szwajcarskiej	
16	Cesarza Ottomańskiego	zasięg terytorialny większy niż dzisiejsza Turcja
17	Prezydenta Republiki Wenezueli	

„Międzynarodowa Konwencja wprowadzająca zmiany do Konwencji podpisanej w Paryżu dnia 20 maja 1875r., podpisana w Sevres dnia 6 października 1921 r.” zawarta pomiędzy

1	Niemcami	15	Węgrami
2	Republiką Argentyńską	16	Włochami
3	Austrią	17	Japonią
4	Belgią	18	Meksykiem
5	Brazylią	19	Norwegią
6	Bułgarią	20	Peru
7	Kanadą	21	Portugalią
8	Chili	22	Rumunią
9	Danią	23	Państwem Serbów, Kroatów i Słoweńców (Jugosławią)
10	Hiszpanią	24	Stanami Zjednoczonymi Ameryki
11	Sjamem (Tajlandią)	25	Szwecją
12	Finlandią	26	Szwajcarią
13	Francją	27	Urugwajem
14	Wielką Brytanią		

kogo brak?

Dzisiejsze państwa sygnatariusze Konwencji Metrycznej i daty ich przystąpienia – ratyfikowania Konwencji na podstawie praw konstytucyjnych obowiązujących w tych państwach (daty wynikają np. z rozpadu państw wielonarodowych po I Wojnie Światowej, procesu dekolonizacji po II Wojnie Światowej i procesu upadku komunizmu w Europie)

l.p.	kraj	rok	l.p.	kraj	rok	l.p.	kraj	rok	l.p.	kraj	rok
1	Arabia Saudyjska	2011	17	Estonia	2021	34	Korea Pd.	1959	51	Słowacja	1922
2	Argentyna	1877	18	Finlandia	1923	35	Kostaryka	2022	52	Słowenia	2016
3	Australia	1947	19	Francja	1875	36	Litwa	2015	53	Szwecja	1875
4	Austria	1876	20	Grecja	2001	37	Malezja	2001	54	Szwajcaria	1875
5	Belgia	1875	21	Hiszpania	1875	38	Maroko	2019	55	Tajlandia	1912
6	Brazylia	1921	22	Holandia	1929	39	Meksyk	1890	56	Tunezja	2012
7	Białoruś	2020	23	Indie	1957	40	Niemcy	1875	57	Turcja	1875
8	Bułgaria	1911	24	Indonezja	1960	41	Norwegia	1875	58	Ukraina	2018
9	Chile	1908	25	Iran	1975	42	Nowa Zelandia	1991	59	Urugwaj	1908
10	Chiny	1977	26	Irak	2013	43	Pakistan	1973	60	USA	1878
11	Chorwacja	2008	27	Irlandia	1925	44	Polska	1925	61	Węgry	1876
12	Czarnogóra	2018	28	Izrael	1985	45	Portugalia	1876	62	Wielka Brytania	1884
13	Czechy	1922	29	Japonia	1885	46	Rosja	1875			
14	Dania	1875	30	Kanada	1907	47	RPA	1964	63	Włochy	1875
15	Egipt	1962	31	Kazachstan	2008	48	Rumunia	1883	64	Zjednoczone Emiraty Arabskie	2015
16	Ekwador	2019	32	Kenia	2010	49	Serbia	2001			
			33	Kolumbia	2013	50	Singapur	1994			

Dzisiejsze (wrzesień 2024 r.) państwa biorące udział w pracach CGPM,
ale niebędące sygnatariuszami Konwencji Metrycznej i daty początku ich prac w CGPM

l.p.	kraj	rok	l.p.	kraj	rok	l.p.	kraj	rok
1	Albania	2007	13	Kambodża	2021	25	Panama	2003
2	Azerbejdżan	2015	14	Katar	2016	26	Paragwaj	2009
3	Bangladesz	2010	15	Kuwejt	2018	27	Peru	2009
4	Boliwia	2008	16	Luksemburg	2014	28	Sri Lanka	2014
5	Bośnia i Hercegowina	2011	17	Łotwa	2001	29	Syria	2012
6	Botswana	2012	18	Macedonia Pn.	2006	30	Tajwan	2002
7	Etiopia	2018	19	Malta	2001	31	Tanzania	2018
8	Filipiny	2002	20	Mauritius	2010	32	Uzbekistan	2018
9	Ghana	2009	21	Mołdawia	2007	33	Wietnam	2003
10	Gruzja	2008	22	Mongolia	2013	34	Wspólnota Karaibska*	2005
11	Hong Kong	2000	23	Namibia	2012	35	Zambia	2010
12	Jamajka	2003	24	Oman	2012	36	Zimbabwe	2022

* Antigua i Barbuda, Barbados, Belize, Dominika, Grenada, Gujana, St. Kitts & Nevis, St. Lucia,
St. Vincent i Grenadiny, Surinam, Trynidad i Tobago

- 1889 r., I CGPM: uznanie przytoczonych definicji **metra**, **kilograma** i **sekundy** (układ MKS) oraz wzorców metra i kilograma (wzorcami sekundy były zwyczajowo dokładne zegary).
- 1948 r., IX CGPM: wskazanie potrzeby utworzenia międzynarodowego, spójnego, praktycznego, układu jednostek miar do powszechnego stosowania w nauce, przemyśle i handlu.
- 1954 r., X CGPM: jednostki podstawowe: **metr**, **kilogram**, **sekunda**, **amper** dla prądu elektrycznego (usankcjonowanie układu MKSA (MKS Giorgiego) postulowanego od początku XX w.), **stopień Kelvina** dla temperatury termodynamicznej, **kandela** dla światłości.
- 1960 r., XI CGPM: formalne ustanowienie układu SI (*Le Systeme International d'Unites*) jako układu z 6-cioma jednostkami podstawowymi.
- 1971 r., XIV CGPM: dodatkowo **mol** dla ilości materii
– ustalenie dzisiejszej postaci układu SI jako układu o 7 jednostkach podstawowych.
- 2018 r., XXVI CGPM: zdefiniowanie wszystkich jednostek podstawowych w oparciu o (przyjmowane dziś przez fizyków i uznawane za niezmiennie) wartości stałych: prędkości światła w próżni, Plancka, wartości ładunku elementarnego, Boltzmanna i liczby Avogadro, oraz o pomiar częstotliwości drgań tzw. zegara atomowego i pomiar światłości źródła światła monochromatycznego o określonej skuteczności świetlnej (tzw. **redefinicja układu SI**) – nowe definicje obowiązują od 20 maja 2019 r. – 144 rocznicy podpisania Konwencji Metrycznej.

2022 r., XXVII CGPM: **zapowiedź** zmian definicji i wzorców jednostek miar układu SI w kierunku **wersji cyfrowych**, jako efektu **współpracy BIPM i CIPM** z innymi międzynarodowymi instytucjami zajmującymi się metrologią (np. z Międzynarodową Organizacją Metrologii Prawnej (**OIML**)), standaryzacją (np. z Międzynarodową Organizacją Normalizacyjną (**ISO**) i z Międzynarodową Komisją Elektrotechniczną (**IEC**)), jakością laboratoriów badawczych (np. z Międzynarodową Organizacją Współpracy w zakresie Akredytacji Laboratoriów (**ILAC**)) i nauką (np. z Komitetem Danych dla Nauki i Techniki (**CODATA**)).

Układ SI

7-jednostkowy układ jednostek podstawowych jako efekt analizy wielkości i jednostek podstawowych w aspekcie wymagań praktyki pomiarowej i naukowej

wybrano:

- jednostkę długości – metr (m)
- jednostkę masy – kilogram (kg)
- jednostkę czasu – sekundę (s)

do opisu mechaniki

z dodaniem dodatkowych jednostek odpowiednich do dziedziny, w której mają być używane:

- jednostki prądu elektrycznego – ampera (A), dla elektrodynamiki
- jednostki temperatury termodynamicznej – kelwina (K), dla ciepła (termodynamiki)
- jednostki światłości – kandeli (cd), dla fotometrii
- jednostki ilości materii – mola (mol), dla chemii i fizyki atomowej

Układ SI tworzą:

- jednostki podstawowe – 7: m, kg, s, A, K, cd, mol
- jednostki pochodne, wyrażone przez iloczyny i ilorazy jednostek podstawowych
(i pochodnych o własnych nazwach; można używać tylko jednostki podstawowe):

2 jednostki 2 wielkości kątowych (kiedyś wyodrębnione jako uzupełniające)

33 jednostki 48 wielkości mechanicznych

25 jednostek 41 wielkości cieplnych

34 jednostki 57 wielkości elektrycznych i magnetycznych

15 jednostek 27 wielkości optycznych

8 jednostek 13 wielkości akustycznych

19 jednostek 45 wielkości fizykochemicznych

12 jednostek 13 wielkości promieniowania jonizującego

12 jednostek 46 wielkości fizyki atomowej i jądrowej

mniej liczba jednostek od liczby wielkości wynika z jednorodności, homologiczności i bezwymiarowości części wielkości

Niektóre jednostki pochodne wielkości mechanicznych

rad radian	kąt płaski	sr steradian	kąt bryłowy	Hz herc	częstotliwość
m ²	powierzchnia	m ³	objętość	$\frac{1}{m}$	krzywizna
$\frac{m}{s}$	prędkość	$\frac{rad}{s}$	częstotliwość kołowa (częstość, pulsacja), prędkość kątowa		
$\frac{m}{s^2}$	przyspieszenie	$\frac{rad}{s^2}$	przyspieszenie kątowe		
kg·m ²	moment bezwładności				
N niuton	siła, ciężar	N·s	popęd (impuls siły)		
N·m	moment siły	N·m·s	impuls momentu siły		
$\frac{N}{m^3}$	ciężar właściwy, gradient ciśnienia				
Pa paskal	ciśnienie, naprężenie normalne i styczne				
J dżul	praca, energia kinetyczna i potencjalna, funkcja Hamiltona i Lagrange’a				
W wat	moc				
Pa·s	lepkość dynamiczna	$\frac{m^2}{s}$	lepkość kinetyczna		

Niektóre jednostki pochodne wielkości elektrycznych i magnetycznych

$\frac{A}{m^2}$	gęstość prądu elektrycznego		$\frac{C}{m^3}$	gęstość ładunku elektrycznego
C kulomb	ładunek elektryczny, strumień elektryczny			
V wolt	napięcie elektryczne, SEM, potencjał elektryczny			
$\frac{V}{m}$	natężenie pola elektrycznego		$\frac{A}{m}$	natężenie pola magnetycznego, namagnesowanie
F farad	pojemność elektryczna		H henr	indukcyjność, indukcyjność wzajemna
$\frac{F}{m}$	przenikalność elektryczna		$\frac{H}{m}$	przenikalność magnetyczna
Ω om	rezystancja (opór elektryczny czynny), reaktancja (opór elektryczny bierny), impedancja (opór elektryczny pozorny, zawada)		S simens	konduktancja (przewodność elektryczna), susceptancja (przewodność elektryczna bierna), admitancja (przewodność elektryczna pozorna)
$\Omega \cdot m$	rezystywność (opór elektryczny właściwy)		$\frac{S}{m}$	konduktywność (przewodność elektryczna właściwa)
J džul	energia elektryczna			
W wat	moc czynna (aktywna) prądu elektrycznego			$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} = V \cdot A = \frac{J}{s}$
var war	moc bierna (reaktywna) prądu elektrycznego			
V·A	moc pozorna (całkowita) prądu elektrycznego			
Wb weber	strumień magnetyczny, natężenie bieguna magnetycznego			
T tesla	indukcja magnetyczna, magnetyzacja (polaryzacja magnetyczna)			

Niektóre jednostki pochodne wielkości cieplnych

°C stopień Celsjusza	temperatura termodynamiczna; stopień Celsjusza jest równy kelwinowi; wartość temperatury wyrażonej w stopniach Celsjusza T_C jest równa wartości temperatury wyrażonej w kelwinach T pomniejszonej o wartość 273,15 K
J dżul	ilość ciepła, energia swobodna, energia wewnętrzna, entalpia, potencjał termodynamiczny Gibbsa, ciepło przemiany
W wat	strumień (moc) ciepła

Niektóre jednostki pochodne wielkości akustycznych

Pa paskal	ciśnienie akustyczne	$\frac{W}{m^2}$	natężenie dźwięku
W wat	moc akustyczna (strumień energii akustycznej)		

Niektóre jednostki pochodne wielkości optycznych

$\frac{1}{m}$	zdolność skupiająca układu optycznego, liczba falowa, liniowy współczynnik pochłaniania		
J dżul	energia napromieniowania (ilość energii promienistej)		
W wat	strumień promieniowania (moc strumienia promieniowania)		
lm lumen	strumień świetlny	lx luks	natężenie oświetlenia (illuminancja)
$\frac{lm}{m^2}$	promienność (emitancja światła)	$\frac{cd}{m^2}$	luminancja (jaskrawość, blask, jasność powierzchniowa)
lm's	ilość światła	lx's	naświetlenie

Niektóre jednostki pochodne wielkości fizykochemicznych

$\frac{1}{\text{m}^3}$	gęstość liczby molekuł	$\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$	stężenie molowe		$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	gęstość
$\frac{\text{mol}}{\text{kg}}$	molarność	$\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$	masa molowa		$\frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$	objętość molowa
Pa paskal	ciśnienie cząsteczkowe			kat katal	aktywność katalityczna	
J dżul	energia przyciągania molekularnego, energia oddziaływania między molekułami					

Niektóre jednostki pochodne wielkości promieniowania jonizującego

J dżul	energia cząstki, energia przekazana (integralna dawka pochłonięta)
$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	gęstość strumienia energii (natężenie promieniowania jonizującego)
Gy grej	dawka pochłonięta (absorbowana) (kiedyś rad = 10^{-2} Gy)
Sv siwert	równoważnik dawki pochłoniętej (kiedyś rem = 10^{-2} Sv)
$\frac{\text{C}}{\text{kg}}$	dawka ekspozycyjna (kiedyś rentgen R = $2,58 \times 10^{-4} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$)
Bq bekerel	aktywność źródła promieniotwórczego (do 1973r kiur Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq)
$\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$	aktywność własna źródła promieniotwórczego

Formalizm układu SI dopuszcza stosowanie pewnych jednostek spoza tego układu.

Są to jednostki miar używane powszechnie i „od zawsze” (są elementem kultury tzw. zachodniej), i dla których ogólnie znane są ich wartości w jednostkach z układu SI.

Można, bez zarzutów o brak stosowania jednostek z układu SI, mierzyć:

- czas w minutach ($1 \text{ min} = 60 \text{ s}$), godzinach ($1 \text{ h} = 60 \text{ min}$) i dobach ($1 \text{ d} = 24 \text{ h}$),
- kąty płaskie w stopniach ($1^\circ = \frac{\pi}{180} \text{ rad}$), minutach ($1' = \frac{1^\circ}{60}$) i sekundach ($1'' = \frac{1'}{60}$) katowych,
- powierzchnię gruntów w hektarach ($1 \text{ ha} = 10\,000 \text{ m}^2$),
- objętość w litrach ($1 \text{ l} = 1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 0,001 \text{ m}^3$; symbol L (wielka litera) stosuje się, gdy symbol l (mała litera) może być mylnie odczytany jako 1 (cyfra)),
- masę w tonach ($1 \text{ t} = 1000 \text{ kg}$) i daltonach, równoważnych jednostce masy atomowej ($1 \text{ Da} = 1 \text{ u} = 1,660\,539\,040 \times 10^{-27} \text{ kg}$),
- długość w jednostkach astronomicznych ($1 \text{ AU} = 149\,597\,870\,700 \text{ m}$),
- energię w elektronowoltach ($1 \text{ eV} = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ J}$),
- stosunki dwóch wartości tej samej wielkości w ich logarytmach naturalnych (neperach (Np)) i dziesiętnych (belach (B) i decybelach (dB)).

Innych jednostek układ SI nie dopuszcza, choć „ma świadomość” ich popularnego stosowania w wielu krajach (np. jednostek układu anglosaskiego). Takie inne jednostki miar mogą być dopuszczone do stosowania w konkretnym państwie odpowiednim aktem prawnym.

Jednostki miar spoza układu SI legalne w Polsce

- ar ($1 \text{ a} = 10^2 \text{ m}^2$) i hektar ($1 \text{ ha} = 10^4 \text{ m}^2$) dla powierzchni
- litr ($1 \text{ l} = 1 \text{ L} = 10^{-3} \text{ m}^3 = 1 \text{ dm}^3$) dla objętości
- tona ($1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg}$) dla masy
- minuta ($1 \text{ min} = 60 \text{ s}$), godzina ($1 \text{ h} = 60 \text{ min}$), doba ($1 \text{ d} = 24 \text{ h}$) dla czasu
- stopień ($1^\circ = \frac{\pi}{180} \text{ rad}$), minuta ($1' = \frac{1^\circ}{60}$) i sekunda ($1'' = \frac{1'}{60}$) dla kąta płaskiego
- grad, gon ($1 \text{ gon} = \frac{2\pi}{400} = \frac{\pi}{200} \text{ rad}$) dla kąta płaskiego
- kąt płaski pełny, obrót ($1 \text{ obrót} = 2\pi \text{ rad}$) dla pełnego obrotu ciała wokół osi obrotu
- elektronowolt ($1 \text{ eV} \approx 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$) dla energii cząstek
- jednostka masy atomowej ($1 \text{ u} \approx 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$) dla masy atomowej
- barn ($1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$) dla przekroju czynnego
- teks ($1 \text{ tex} = 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$) dla stosunku masy do długości nici włókienniczych
- dioptria ($1 \text{ d} = \frac{1}{\text{m}}$) dla zdolności skupiającej układu optycznego
- karat metryczny ($1 \text{ ct} = \frac{1}{5000} \text{ kg} = 0,2 \text{ g} = 200 \text{ mg}$) dla masy kamieni szlachetnych
- bar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$) dla ciśnienia
- milimetr słupa rtęci ($1 \text{ mmHg} = 133,322 \text{ Pa}$) dla ciśnienia krwi i innych płynów ustrojowych

- rentgen ($1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$) dla dawki ekspozycyjnej promieniowania X i γ
- amperogodzina ($1 \text{ Ah} = 3600 \text{ C}$) dla ładunku elektrycznego
- war ($1 \text{ var} = 1 \text{ W}$) dla mocy biernej odbiornika energii elektrycznej
- woltoamper ($1 \text{ VA} = 1 \text{ W}$) dla mocy pozornej odbiornika energii elektrycznej
- watogodzina ($1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$) dla energii
- neper (Np) dla logarytmu naturalnego oraz bel (B) i decybel (dB) dla logarytmu dziesiętnego stosunku dwóch wartości tej samej wielkości
- procent ($1 \% = 0,01$) dla stosunku dwóch wartości tej samej wielkości, czyli dla wielkości bezwymiarowych
- jednostki pochodne, wyrażone za pomocą iloczynów i ilorazów jednostek miar wymienionych powyżej lub tych jednostek i jednostek z układu SI, np.:
 - km/h dla prędkości
 - obr/s, obr/min dla prędkości obrotowej
 - m^3/min , m^3/h , l/s, l/min, l/h dla strumienia (przepływu) objętości
 - kg/h, t/h dla strumienia (przepływu) masy

Jednostki takie jak: koń mechaniczny (KM), kaloria (cal), atmosfera fizyczna (atm), atmosfera techniczna (at), tor (równoważny mmHg), milimetr słupa wody (mm H₂O), angstrom (Å) i inne, niewystępujące w SI i niewymienione powyżej, są w Polsce jednostkami „nielegalnymi”, pomimo ich jeszcze częstego stosowania.

Jednostki miar nieznajdujące się wśród jednostek układu SI i jednostek dopuszczonych do stosowania spoza układu SI **możliwe do stosowania w działalności związanej z obronnością państwa** (i uczestnictwem w NATO z państwami, w których korzysta się z anglosaskiego lub technicznego układu jednostek lub innych jednostek zwyczajowych):

- dla długości: cal, stopa, jard, mila międzynarodowa i mila morska międzynarodowa
- dla powierzchni: cal kwadratowy i stopa kwadratowa
- dla objętości: cal sześcienny, stopa sześcienna, uncja objętości brytyjska, kwarta brytyjska i galon brytyjski
- dla masy: uncja i funt
- dla prędkości: mach, węzeł, mila na godzinę i mila na sekundę
- dla ciśnienia: gram-siła na centymetr kwadratowy, kilogram-siła na centymetr kwadratowy (czyli atmosfera techniczna), milimetr słupa wody, tor (czyli milimetr słupa rtęci), funt-siła na cal kwadratowy i kilopond na centymetr kwadratowy
- dla stężenia roztworów: uncja objętości na galon i funt na galon
- dla siły: funt-siła i kilogram-siła
- dla momentu siły: funt-siła razy cal, funt-siła razy stopa i kilogram-siła razy metr
- dla temperatury: stopień Fahrenheita
- dla kąta: tysięczna artyleryjska
- dla równoważnika dawki pochłoniętej: rem
- dla aktywności ciała promieniotwórczego: kiur

Jednostki **wtórne** – wielokrotności i podwielokrotności jednostek zasadniczych (podstawowych i pochodnych).

Dołączenie przedrostka do nazwy zasadniczej jednostki miary (symbolu przedrostka do symbolu jednostki) wyraża użycie odpowiedniego mnożnika dziesiętnego.

Przedrostek (symbol przedrostka) umieszcza się bezpośrednio (bez jakiegokolwiek przerwy, kropki, kreski czy innego znaku) przed nazwą (symbolem) jednostki i pisze literami prostymi.

nazwa przedrostka	symbol przedrostka	krotność jednostki	nazwa liczebnikowa jednostki	
quetta	Q	10^{30}	kwintylion	jednostek
ronna	R	10^{27}		
jotta	Y	10^{24}	kwadrylion	jednostek
zetta	Z	10^{21}	tryliard	jednostek
eksa	E	10^{18}	trylion	jednostek
peta	P	10^{15}	biliard	jednostek
tera	T	10^{12}	bilion	jednostek
giga	G	10^9	miliard	jednostek
mega	M	10^6	milion	jednostek
kilo	k	10^3	tysiąc	jednostek
hekto	h	10^2	sto	jednostek
deka	da	10	dziesięć	jednostek
decy	d	10^{-1}	dziesiąta	jednostki
centy	c	10^{-2}	setna	jednostki
mili	m	10^{-3}	tysięczna	jednostki
mikro	μ	10^{-6}	milionowa	jednostki
nano	n	10^{-9}	miliardowa	jednostki
piko	p	10^{-12}	bilionowa	jednostki
femto	f	10^{-15}	biliardowa	jednostki
atto	a	10^{-18}	trylionowa	jednostki
zepto	z	10^{-21}	tryliardowa	jednostki
jokto	y	10^{-24}	kwadrylionowa	jednostki
ronto	r	10^{-27}		
quecto	q	10^{-30}	kwintylionowa	jednostki

Nie używa się przedrostków podwójnych.

źle	dobrze
mμs	ns
kMW	GW
μμF	pF

Połączenie symbolu przedrostka z symbolem jednostki jest traktowane jako nowy symbol:

- cm^3 to $(0,01\cdot\text{m})^3 = 0,000001\cdot\text{m}^3$ a nie $0,01\cdot\text{m}^3$
- μs^{-1} to $(0,000\,001\cdot\text{s})^{-1} = \frac{1}{0,000\,001\,\text{s}} = \frac{1\,000\,000}{\text{s}}$ a nie $0,000\,001\cdot\frac{1}{\text{s}}$
- km^2 to $(1\,000\cdot\text{m})^2 = 1\,000\,000\cdot\text{m}^2$ a nie $1\,000\cdot\text{m}^2$

Nazwy i symbole wtórnych jednostek miar mogą być użyte do tworzenia nazw i symboli złożonych, np.: $\frac{\text{km}}{\text{s}}$, $\frac{\text{mm}}{\text{s}^2}$, $\frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$.

Jeżeli w zapisie wartości wielkości występuje 10 do potęgi całkowitej (dodatniej lub ujemnej), to wartość tę wyraża się w jednostkach podstawowych lub pochodnych o nazwie prostej.

źle	dobrze
10^{15} GeV	10^{24} eV
10^{-5} cm	10^{-7} m
10^{-3} g	10^{-6} kg

Wartości liczbowe wyrażone w jednostkach powstałych z zastosowaniem przedrostków jednostek wtórnych powinny składać się z możliwie najmniejszej liczby cyfr.

źle	dobrze
0,0752 mm	75,2 μ m
8560 pm	8,56 nm
10000 kW	10 MW
1000 hPa	100 kPa, 0,1 MPa

kilogram – jedyna jednostka podstawowa z przedrostkiem kilo w nazwie bezpośredniej z przyczyn historycznych. Nazwy jej dziesiętnych wielokrotności i podwielokrotności otrzymuje się w wyniku przyłączenia odpowiedniego przedrostka tylko do słowa „gram”

kg – jednostka miary miligram – jednostka podkrotna megagram – jednostka nadkrotna							
1 mg	=	10^{-3} g	=	10^{-6} kg	=	1 μ kg	
1 Mg	=	10^6 g	=	10^3 kg	=	1 kkg	= 1 t (tona)
dobrze		źle (dobrze w CGS)		dobrze		źle	dopuszczalnie

Mnożenie jednostek zapisuje się za pomocą:

- kropki mnożenia, np.: N·m, Pa·s, kW·s,
- pojedynczego odstępu (spacji), np. N m, Pa s, kW s.

Jedyne dopuszczalne w Polsce wyjątki: Ah, Wh, varh i VA – pisownia bez kropki lub odstępu.

Częsty błąd: Nm

Dzielenie jednostek zapisuje się za pomocą:

- kropki mnożenia (pojedynczego odstępu) i ujemnych wykładników, np.: m·s⁻¹,
- kreski ukośnej; jeżeli w mianowniku występuje iloczyn jednostek, to ujmuje się go w nawias), np.: m/s, m/(kg·s), przy czym nie można używać dwóch i więcej kresek ukośnych,
- kreski ułamkowej, np.: $\frac{m}{s}$, przy czym nie można używać dwóch i więcej kresek ułamkowych.

źle	dobrze
$\frac{cm}{s/s}, \frac{s}{s}$	$cm \cdot s^{-2}, cm s^{-2}, cm/s^2, \frac{cm}{s^2}$
$J/K/mol, J/mol/K, \frac{J}{K/mol}, \frac{J}{mol/K}$	$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}, J K^{-1} mol^{-1}, J/(K \cdot mol), J/(K mol), \frac{J}{K \cdot mol}, \frac{J}{K mol}$

Nazwy jednostek powstałych przez dzielenie jednostek o nazwach własnych tworzy się z użyciem przyimka „na” (np.: metr **na** sekundę, dżul **na** mol).

Nazwy jednostek powstałych przez mnożenie jednostek o nazwach własnych tworzy się z użyciem międzywyrazowego łącznika literowego „o” (np.: niuton**o**metr, wolto**o**amper, paskalo**o**sekunda, om**o**metr) lub po prostu słowa „razy” (np.: niuton **razy** metr) gdy zastosowanie łącznika „o” prowadzi do niejednoznaczności lub nie jest pożądane ze względów fonetycznych.

Gdy mnożenie jednostek o nazwach własnych występuje w mianowniku, to nazwa mianownika jednostki jest tworzona:

- z łącznikiem literowym „o” (np.: ... na niuton**o**metro**o**sekundę).
- z przecinkami i spójnikiem „i” (np.: ... na metr, kilogram, sekundę **i** mol).

Formalizmu układu SI sposobu zapisywania liczb.

Separatorem dziesiętnym w ułamkach dziesiętnych (znakiem rozdzielającym część całkowitą i ułamkową) w tekstach pisanych:

- w języku angielskim jest kropka (*dot*, np. 12.34),
- w wielu innych językach, np. francuskim (oryginalnym dla SI), niemieckim czy polskim, jest przecinek (*koma*, np. 12,34).

Jeśli liczba zawiera dużo cyfr, to można je grupować po trzy licząc od separatora dziesiętnego w prawo i lewo i takie grupy oddzielać niewielkim odstępem (np. 123 456 789,987 654 321).

Znakiem mnożenia liczb powinien być symbol $\times$, a znakiem dzielenia liczb powinien być symbol $/$ (np.: $2 \times 1,5 = 3$, $2/0,5 = 4$).

Przy mnożeniu i dzieleniu wyników pomiarów powinno się stosować nawiasy
(np.: $(2 \text{ N})(1,5 \text{ m}) = 3 \text{ N m}$, $(2 \text{ m})/(0,5 \text{ s}) = 4 \text{ m/s}$).

Układ CGS

1832 r., Gauss: układ z trzema wielkościami podstawowymi:

długość, masa i czas, o jednostkach **milimetr**, **gram** i **sekunda**.

1881 r., I Międzynarodowy Kongres Elektryków:

- zmiana jednostek na **centymetr**, **gram** i **sekundę**,
- dodanie wielkości pochodnych: siły i energii, z jednostkami miary o nazwach własnych: **dyna** i **erg**,
- ustanowienie układów:
 - **CGS ES** (elektrostatycznego) – przenikalność elektryczna próżni $\epsilon_0 = 1$, przenikalność magnetyczna próżni $\mu_0 = 1/c^2$, ładunek elektryczny – wielkość pochodna o wartości 1 gdy działa siłą 1 dyn na ładunek równy sobie umieszczony w próżni w odległości 1 cm,
 - **CGS EM** (elektromagnetycznego) – przenikalność magnetyczna próżni $\mu_0 = 1$, przenikalność elektryczna próżni $\epsilon_0 = 1/c^2$, prąd elektryczny – wielkość pochodna o wartości 1 gdy płynąc w kołowym przewodniku o długości 1 cm działa siłą 1 dyn na jednostkową „masę magnetyczną” umieszczoną w próżni w odległości 1 cm od tego przewodnika,

c – prędkość światła w próżni w cm/s.

1951 r., VII Zgromadzenie Ogólne Międzynarodowej Unii Fizyki Czystej i Stosowanej (*International Union of Pure and Applied Physics* (IUPAP)): 4-jednostkowe układy CGS:

- **CGS ES** z ładunkiem elektrycznym o jednostce **franklin** Fr (ładunek, który na ładunek równy sobie umieszczony w próżni w odległości 1 cm działa siłą 1 dyn) – układ CGS Fr,
- **CGS EM** z prądem elektrycznym o jednostce **biot** Bi (prąd elektryczny niezmieniający się, który płynąc w dwóch równoległych, prostoliniowych, nieskończenie długich przewodach o przekroju kołowym znikomo małym, umieszczonych w próżni w odległości 1 cm jeden od drugiego wywołuje siłę wzajemnego przyciągania tych przewodów równą 2 dyn na każdy 1 cm długości tych przewodów) – układ CGS Bi.

Układ **CGS Gaussa** (mieszany, symetryczny) – jednostki wielkości elektrycznych brano z układu CGS ES, a jednostki wielkości magnetycznych – z układu CGS EM.

Układ CGS rozszerzony o **kelwin** (dla temperatury), **mol** (dla ilości materii) i **kandele** (dla światłości) oraz radian i steradian (dla kątów) był używany do lat 70-tych XX w. – równoległe z MKS, MKSA i SI. Dlatego w układzie CGS stosowano też nazwy jednostek układu SI z przedrostkiem **stat-** dla układu CGS ES i **ab-** dla układu CGS EM, np. statkulomb i abkulomb dla ładunku elektrycznego, statamper i abamper dla prądu elektrycznego, statwolt i abwolt dla napięcia elektrycznego, statom i abom dla rezystancji czy stattesla i abtesla dla indukcji magnetycznej, nawet gdy odpowiednie jednostki układu CGS miały swoje nazwy (np. franklin dla ładunku elektrycznego w CGS ES czy biot dla prądu elektrycznego i gaus dla indukcji magnetycznej w CGS EM).

Przykładowe jednostki układu CGS

siła	dyna	ciśnienie	baria	lepkość dynamiczna	puaz
energia	erg	przyspieszenie	gal	lepkość kinematyczna	stokes
ciepło	kaloria	luminancja	stilb	natężenie oświetlenia	fot
ładunek elektryczny		franklin; statkulomb		biotosekunda; abkulomb	
prąd elektryczny		franklin na sekundę; statamper		biot; abamper	
napięcie elektryczne		franklin na centymetr; statvolt		biotocentymetr na sekundę; abvolt	
rezystancja		sekunda na centymetr, statom		centymetr na sekundę; abom	
natężenie pola magnetycznego		franklin na centymetr i sekundę		ersted	
indukcja magnetyczna		franklinosekunda na centymetr sześcienny; stattesla		gaus; abtesla	
strumień magnetyczny		franklinosekunda na centymetr; statweber		makswel; abweber	
siła magnetomotoryczna		franklin na sekundę		gilbert	

Układ MkGS (techniczny)

Wielkości podstawowe:

długość (z **metrem** m), siła (z **kilogramem-siłą** kG), czas (z **sekundą** s).

Jednostka masy (definiowanej jako $m = \frac{F}{a}$), **inert**, to jednostka pochodna definiowana przez

$$\text{jednostki podstawowe: inert} = \frac{\text{kG} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}.$$

W układzie SI: $1 \text{ inert} = \frac{\text{kg} \cdot 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{s}^2}{\text{m}} = 9,80665 \text{ kg}$ – kłopotliwość przeliczania inertu (technicznej jednostki masy), na kg (jednostkę masy w SI) lub g (jednostkę masy w CGS).

Brak definicji jednostek wielkości innych niż mechaniczne

(cieplnych, elektrycznych, magnetycznych, fotometrycznych, ...).

Jednostka ciśnienia: $\frac{\text{kG}}{\text{m}^2}$ (w SI: 9,806 65 Pa),

ale zwyczajowo też **atmosfera techniczna**: $1 \text{ at} = 1 \frac{\text{kG}}{\text{cm}^2}$ – ciśnienie towarzyszące naciskowi siły 1 kG (masy 1 kg przy normalnym przyspieszeniu ziemskim) na 1 cm^2 . W układzie SI:
 $1 \text{ at} = 98\,066,5 \text{ Pa}.$

Jednostka mocy: $\frac{\text{kG} \cdot \text{m}}{\text{s}}$ (w SI: 9,80665 W),

ale zwyczajowo też **koń mechaniczny**: $1 \text{ KM} = 75 \frac{\text{kG} \cdot \text{m}}{\text{s}}$ – moc potrzebna do podniesienia ciężaru 75 kG na wysokość 1 m w czasie 1 s. W układzie SI:

$$1 \text{ KM} = 75 \frac{\text{kG} \cdot \text{m}}{\text{s}} = 75 \times \frac{9,806\,65 \text{ N} \cdot \text{m}}{\text{s}} = 735,5 \text{ W}.$$

Anglosaskie systemy jednostek miar z nieco inaczej wartościowanymi niektórymi jednostkami brytyjskimi (imperialnymi) i amerykańskimi, podobnie do układów metrycznych, mają wersje masowe i ciężarowe.

Na podstawie umów międzynarodowych pomiędzy państwami stosującymi układy anglosaskie (np. pomiędzy USA, Wielką Brytanią, Kanadą, Australią, Nową Zelandią czy RPA) wartości większości z nich zostały uzgodnione jako tzw. **jednostki międzynarodowe** układu anglosaskiego (nie mylić z układem międzynarodowym jednostek SI).

Od 1898 r., na mocy brytyjskiej Ustawy o Wagach i Miarach (Metrycznych) z 1897 r.

(The Weights and Measures (Metric) Act):

- jard to $36/39,370113 \approx 0,9144$ metra,
- funt to 0,45359243 kg (od 1963 r. ostatnie dwie cyfry liczby zmieniono na 37, aby dopasować przeliczenie do przyjętej wartości ustalonego funta międzynarodowego).

Można więc o nich powiedzieć, że z punktu widzenia układu SI są pozaukładowymi jednostkami pochodnymi metra i kilograma.

wielkość	polska nazwa jednostki	angielska nazwa jednostki	symbol jednostki	wartość jednostki w SI
długość	mila lądowa staja jard stopa cal punkt mila morska kabel sążeń	mile furlong yard foot inch point nautical mile cable fathorm	mi = 8 fur = 1760 yd fur = 220 yd yd = 3 ft ft lub ' = 12 in in lub " pt nmi = 10 cab = 1000ftm cab = 100 ftm ftm $\approx$ 6,076 ft	1,609 km 201,17 m 91,44 cm 30,48 cm 2,54 cm 0,353 mm 1,852 km 185,2 m 1,852 m
pow.	akr	acre	ac = 4840 yd ²	4046,86 m ²
objętość	galon brytyjski pinta brytyjska uncja cieczy brytyjska galon cieczy amerykański pinta cieczy amerykańska uncja cieczy amerykańska galon suchy amerykański pinta sucha amerykański	gallon pint fluid ounce liquid US gallon liquid US pint US fluid ounce dry US gallon dry US pint	UK gal = 8 UK pt UK pt = 20 UK fl oz UK fl oz liq. US gal = 8 liq. US pt liq. US pt = 16 US fl oz US fl oz dry US gal = 8 dry US pt dry US pt	4,546 dm ³ 0,568 dm ³ 28,413 cm ³ 3,785 dm ³ 0,473 dm ³ 29,57 cm ³ 4,405 dm ³ 0,551dm ³

masa	tona brytyjska tona amerykańska funt uncja	long ton short ton pound ounce	UK ton = 2240 lb US ton = 2000 lb 1 lb = 16 oz 1 oz	1016 kg 907 kg 0,4536 kg 28,35 g
siła	paundal (układ masowy) funt-siła (układ ciężarowy)	poundale pound force	1 pdl 1 Lb = 1 lbf	0,138 N 4,448 N
ciśnienie	funt-siła na cal kwadratowy (układ ciężarowy)	pound-force per square inch	$1 \frac{\text{Lb}}{\text{in}^2} = 1 \text{ psi}$	6894,76 Pa
moc	stopofunt-siła na sekundę (układ ciężarowy) koń mechaniczny*	footpound-force per second horse power	$1 \frac{\text{Lb} \cdot \text{ft}}{\text{s}}$ 1 HP	1,356 W 745,7 W
kąt	rumb	rumb	-	$\frac{360^\circ}{32} = 11,25^\circ$

* moc potrzebna na podniesienie ciężaru 550 funtów-siła na wysokość 1 stopy w czasie 1 sekundy

Temperaturę w skalach Kelvina T , Celsjusza T_C i Fahrenheita T_F przelicza się wg zależności:

$$T = T_C + 273,15 = \frac{5}{9}(T_F - 32) + 273,15$$

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32) = T - 273,15$$

$$T_F = \frac{9}{5}(T - 273,15) + 32 = \frac{9}{5}T_C + 32$$

Skale twardości materiałów. Twardość – miara odporności materiału na odkształcenia trwałe powstające podczas wciskania wgłębnika.

Skala Mohsa – twardość wybranych minerałów występujących w przyrodzie, uszeregowanych wg zasady, że minerał twardszy zarysowuje minerał miększy.

Skala Brinella – pomiar rozmiaru wgniecenia stalowej kulki wgniatanej w badany materiał przez określony czas ustaloną siłą.

Skale Rockwella A, B, C, F, N i T – pomiar rozmiaru wgniecenia diamentowego stożka o zaoblonym wierzchołku lub stalowej kulki wgniatanych w badany materiał przez określony czas zmienną, dwuwartościową siłą.

Skala Vickersa – pomiar rozmiaru wgniecenia diamentowego ostrosłupa foremnego o podstawie kwadratowej wgniatanego w badany materiał bez wstrząsów i drgań najpierw stopniowo zmienną (od 0 do maksymalnej) siłą w czasie 15 s, a potem stałą (maksymalną) siłą w czasie (10÷15) s.

Skala wiatrów Beauforta (1774-1857) opracowana dla oceny prędkości wiatru poprzez ocenę jego wpływu na środowisko.

Skale magnitud (otwarte, np. **Richtera**) **i siły (intensywności)** (zamknięte, np. 12-stopniowa skala europejska **EMS-98**) **trzęsień Ziemi**, przyjęte do określania „wielkości” trzęsień Ziemi.

Powstawanie układów jednostek miar jest związane z ustaleniem wzorców jednostek miar (**etalonów**) różnych wielkości fizycznych.

Etalon (wzorzec jednostki miary):

- fizyczny obiekt lub charakterystyka pewnej aparatury fizycznej reprezentujące koncepcję jednostki, wybrane do ilościowego wyrażenia miary danej cechy mierzalnej (wielkości),
- przyrząd pomiarowy przeznaczony do zdefiniowania, zrealizowania, zachowania lub odtwarzania jednostki miary albo jednej lub wielu wartości danej wielkości fizycznej i służący jako odniesienie – definicja z Ustawy – Prawo o miarach.

Występują **etalony pierwotne (podstawowe)** i **wtórne (świadki)**, powstałe przez porównanie z etalonem pierwotnym.

Przykład etalonu pierwotnego – obiektu fizycznego – platynowa listwa o długości będącej wzorcem długości jednego metra, przechowywana we francuskim Archiwum Państwowym (jeden egzemplarz na świecie).

Przykład etalonu pierwotnego – charakterystyki aparatury – źródło światła emitujące fale elektromagnetyczne o długości, której odpowiednia liczba (krotność) odpowiada długości jednego metra (każda odpowiednio wykonana i zasilana świecąca lampa lub laser mogą być etalonem).

Każda jednostka miary i jej etalon są dziełem człowieka, zaś ogólna filozofia stosowana przy tworzeniu etalonów pierwotnych polega na ich oparciu na jakiejś fizycznej zasadzie, w miarę możliwości niezmiennej.

Światową normalizacją jednostek miar i ich etalonów w kontekście Konwencji Metrycznej i układu jednostek SI zajmuje się Międzynarodowe Biuro Miar (BIPM).

Listopad 2018 r., XXVI CGPM: redefinicja jednostek podstawowych SI: wszystkie jednostki podstawowe zdefiniowano w oparciu o przyjmowane dziś przez fizyków i uznawane za niezmiennie wartości stałych:

- prędkości światła w próżni,
- Plancka,
- wartości ładunku elementarnego,
- Boltzmann,
- Avogadro,

oraz o pomiar:

- częstotliwości drgań tzw. zegara atomowego (konkretnie cezowego),
- światłości źródła światła monochromatycznego o określonej skuteczności świetlnej.

Ostateczne odejście od definiowania jednostek miar w oparciu o własności obiektów materialnych (oprócz cezowego zegara atomowego).

Nowe praktyczne realizacje tych jednostek (wzorce) można konstruować w oparciu o **dowolnie wybrane prawa fizyki** wiążące z sobą stałe liczbowe przyjęte do definiowania jednostek podstawowych, a jedynym ograniczeniem ich wyboru jest pożądana dokładność skonstruowanego wzorca.

Załącznik nr 2 do 9-tej Broszury SI, pt. *Realisation pratique des principales unites – Practical realization of the definitions of some important units*, dostępny na stronie internetowej BIPM w formie plików w formacie pdf, wymienia **przykładowe** sposoby realizacji wzorców jednostek układu SI (eksperymentów fizycznych) o najmniejszej szacowanej niepewności możliwe do realizacji w laboratoriach metrologicznych o odpowiednim poziomie technicznym i naukowym.

Etalon międzynarodowy – etalon uznawany umową międzynarodową za podstawę do ustalenia wartości wszystkich innych etalonów danej wielkości – jest to etalon pierwotny w ramach takiej umowy, wszystkie inne, których wartość została ustalona przez porównanie z nim to wzorce wtórne.

Etalon państwowy (krajowy) – etalon uznawany urzędowo w danym państwie za podstawę do ustalania wartości wszystkich innych etalonów danej wielkości w tym państwie – jest to etalon pierwotny w tym państwie, wszystkie inne, których wartość została ustalona przez porównanie z nim to wzorce wtórne.

Jednostką administracji państwowej odpowiedzialną w Polsce za etalony krajowe jest **Prezes Głównego Urzędu Miar**.

Etalon wtórny (świadek) – etalon, którego wartość jest ustalona przez porównanie z etalonem międzynarodowym lub państwowym. Nie powinien być gorszy (choć często jest mniej dokładny), ale dodatkowy.

Spójność pomiarowa – właściwość wyniku pomiaru uzyskanego za pomocą danego wzorca jednostki miary, który można porównać z wzorcami państwowymi lub międzynarodowymi za pośrednictwem **nieprzerwanego łańcucha porównań o określonej niepewności**.

1999 r.: *Porozumienie o wzajemnym uznawaniu państwowych wzorców jednostek miar oraz świadectw wzorcowania i świadectw pomiarów wydawanych przez Krajowe Instytucje Metrologiczne* państw stron Konwencji Metrycznej, znane jako CIPM MRA (*CIPM Mutual Recognition Arrangement*). Określono m.in. obowiązek udziału państw sygnatariuszy we wzajemnych porównaniach pozwalających na określenie stopnia równoważności etalonów państwowych oraz możliwości pomiarowych krajowych instytutów metrologicznych (w Polsce GUM).

SEKUNDA - definicje

z 1791 r, potwierdzona w 1889 r. na I CGPM: czas trwania $\frac{1}{86\,400}$ średniej doby słonecznej

(o czasie trwania określonym przez astronomów i przyjętym ostatecznie przez Międzynarodową Unię Astronomiczną, gdy już powstała w 1919 r.),

z 1960 r.: czas trwania $\frac{12\,960\,276\,813}{408\,986\,496} \times 10^{-9} = \frac{1}{31\,556\,925,974\,7}$ roku zwrotnikowego 1900

dla czasu Greenwich (o czasie trwania określonym przez astronomów i przyjętym przez Międzynarodową Unię Astronomiczną w 1952 r.),

z 1967 r.: czas trwania 9 192 631 770 okresów promieniowania (elektromagnetycznego) odpowiadającego przejściu elektronu między dwoma nadsubtelnymi poziomami energetycznymi stanu podstawowego (w odpowiednio niskiej temperaturze) atomu izotopu cezu ^{133}Cs ,

od maja 2019 r.: jednostka czasu definiowana przez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej częstotliwości cezowej $\nu_{^{133}\text{Cs}}$, czyli częstotliwości nadsubtelnego przejścia w atomie izotopu cezu ^{133}Cs znajdującym się w niezaburzonym stanie podstawowym, dla której przyjmuje się wartość 9 192 631 770 Hz, gdzie Hz jest odwrotnością definiowanej sekundy.

$$1\text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{\nu_{^{133}\text{Cs}} \left[\text{Hz} = \frac{1}{\text{s}} \right]}$$

od maja 2019 r.: jednostka czasu definiowana przez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej częstotliwości cezowej $\nu_{133\text{Cs}}$, czyli częstotliwości nadsubtelnego przejścia w atomie izotopu cezu ^{133}Cs znajdującym się w niezaburzonym stanie podstawowym, dla której przyjmuje się wartość 9 192 631 770 Hz, gdzie Hz jest odwrotnością definiowanej sekundy.

Definicja ta sprowadza się do tego, że sekunda jest czasem trwania 9 192 631 770 okresów promieniowania elektromagnetycznego związanego z przejściami elektronu pomiędzy dwoma nadsubtelnymi poziomami energetycznymi niezaburzonego stanu podstawowego atomu izotopu cezu ^{133}Cs , a więc sprowadza się do definicji z 1967 r.

SEKUNDA - wzorce

historycznie: zegary mechaniczne o uzyskiwanej dokładności,

od lat 30-tych XX w.: zegary kwarcowe zawierające stabilizowane rezonatory kwarcowe wykorzystujące wzajemne sprzężenia pola elektrycznego z polem odkształceń mechanicznych płytki kwarcowej (zjawisko piezoelektryczne w kryształach kwarcu odpowiednio wyciętym względem osi krystalograficznych), o uzyskiwanej niepewności względnej rzędu 10^{-7} – dają błąd jednej sekundy na 10^7 sekund, czyli na ok. 120 dni (3 sekundy na rok),

od lat 60-tych XX w.: zegary atomowe, wykorzystujące częstotliwość (sekunda jest odwrotnością herca) promieniowania elektromagnetycznego emitowanego podczas niewymuszonego zewnętrznymi polami przechodzenia elektronu pomiędzy nadsubtelnymi poziomami energetycznymi $F = 4, M = 0$ i $F = 3, M = 0$ poziomu podstawowego $^2S_{1/2}$ w atomie izotopu cezu ^{133}Cs , dla której przyjmuje się wartość 9 192 631 770 Hz – jest to etalon oparty na definicji (taki jest państwowy wzorzec sekundy i herca w Polsce; znajduje się w GUM),

od 2006 r.: kolejne rekomendowane częstotliwości fal promieniowania elektromagnetycznego uzyskiwane dla przejść elektronów między różnymi stanami energetycznymi w różnych atomach jonach i cząsteczkach, dla których przyjmuje się odpowiednie wartości liczbowe (łącznie jest ich obecnie ok. 10, a niektóre z nich są bardziej stabilne niż wzorzec cezowy występujący w definicji sekundy).

Zegary atomowe dają niepewność względną rzędu 10^{-16} – dają błąd jednej sekundy na 10^{16} sekund, czyli na ok. 300 mln lat, i są w stanie utrzymywać tę częstotliwość ze stabilnością względną rzędu 10^{-14} w ciągu kilku miesięcy ciągłej pracy.

Połączenie zegarów atomowych z państwowych laboratoriów metrologicznych różnych państw za pomocą łączności satelitarnej dało „wypadkowy” upływ czasu – ogólnoświatową skalę czasu – tzw. koordynowany czas uniwersalny (*universel temps coordonne* (UTC), *Coordinated Universal Time*).

Upływ tego czasu jest mierzony w oparciu o tzw. międzynarodowy czas atomowy (*temps atomique interanationale* (TAI)), wprowadzony przez XIV CGPM w 1971 r. i ostatecznie zatwierdzony przez XXVI CGPM w 2018 r.

Niepewność mierzenia upływu czasu UTC jest oceniana na kilka nanosekund przy uśrednianiu czasu rzędu kwadransa.

Każdy satelita globalnych systemów nawigacji satelitarnej (*Global Navigation Satellite Systems* (GNSS)), np. w amerykańskim GPS (30 satelitów), w rosyjskim GLONASS (24 satelity), w europejskim (unijnym) Galileo i w chińskim BeiDou, ma wbudowany zegar atomowy emitujący sygnał upływu czasu – czas odmierzany zegarem atomowym jest dostępny dla każdego, kto dysponuje urządzeniem do nawigacji satelitarnej.

Użytkowe wzorce częstotliwości – wzorce kwarcowe wykorzystujące zjawisko piezoelektryczne.

Do rozpowszechniania częstotliwości wzorcowej wykorzystywane jest radio. W Polsce częstotliwość wzorcową 225 kHz, kontrolowaną przez etalon państwowy, emituje Radiostacja Warszawa 1.

METR - definicje

z 1791 r.: długość $\frac{1}{10\,000\,000}$ ćwiartki południka Paryskiego mierzona do bieguna północnego do równika,

z 1889 r.: odległość między kreskami wykonanymi na międzynarodowym etalonie długości – wzorcu 1 metra, przechowywanym w Międzynarodowym Biurze Miar w Sevres (definicja oparta o etalon),

w 1927 r. dodano wyjaśnienie do definicji z 1889 r.: odległość między osiami tych kresek, w temperaturze 0 °C i pod ciśnieniem normalnym, gdy etalon jest podparty dwoma cylindrami o średnicy co najmniej 1 cm symetrycznie rozmieszczonymi względem etalonu w odległości 571 mm od siebie w tej samej płaszczyźnie poziomej,

z 1960 r.: długość 1 650 763,73 długości fali promieniowania (elektromagnetycznej) w próżni emitowanego przez elektron przy przejściu z poziomu energetycznego 2p₁₀ na poziom energetyczny 5d₅ atomu izotopu kryptonu ⁸⁶Kr,

z 1983 r.: długość drogi, jaką światło przebywa w próżni w czasie $\frac{1}{299\,792\,458}$ sekundy,

od maja 2019 r.: jednostka długości definiowana przez przyjęcie ustalonej wartości prędkości światła w próżni $c = 299\,792\,458$ m/s, gdzie s jest definiowaną sekundą.

$$1 \text{ m} = \frac{c \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]}{299\,792\,458 \frac{1}{\text{s}}} \approx 30,663319 \frac{c \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]}{\nu_{133} \text{ Cs} \left[\frac{1}{\text{s}} \right]}$$

od maja 2019 r.: jednostka długości definiowana przez przyjęcie ustalonej wartości prędkości światła w próżni $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$, gdzie s jest definiowaną sekundą.

;

Definicja ta sprowadza się do tej z 1983 r.

Pierwsza propozycja definicji uniezależnionej od wzorca materialnego, oficjalnie nieprzyjęta,
z 1895 r.: 1 553 164,13 długości fali czerwonej linii emisyjnej kadmu (pierwowzór oficjalnej definicji z 1960 r.).

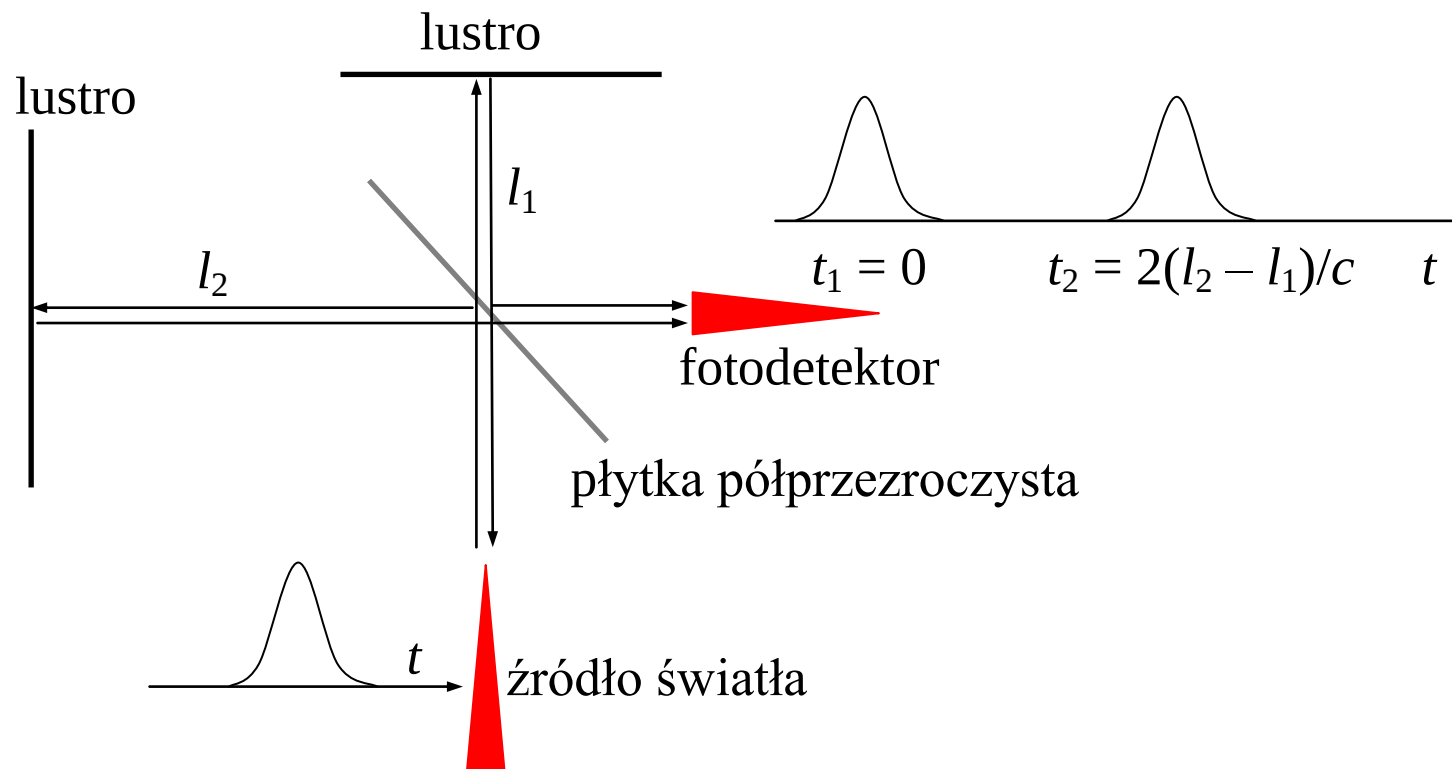
METR - wzorce

- z 1799 r.:** prostokątna sztaba z czystej platyny o wymiarach 4,05 mm na 25 mm na 1 m (wzorcowy), w temperaturze 0 °C (obecnie przechowywana we francuskim Archiwum Państwowym),
- z 1889 r.:** sztaba o przekroju poprzecznym w kształcie zniekształconej litery H lub X ze stopu platyny (90 %) i irydu (10 %) z naciętymi na niej kreskami równoległymi do siebie i prostopadłymi do jej najdłuższego wymiaru (większego od 1 m), w temperaturze 0 °C (obecnie przechowywana w BIPM),
- z 1960 r.:** etalon oparty na definicji – odpowiednia krotność (1 650 763,73) długości fali promieniowania elektromagnetycznego w próżni emitowanego przez lampę kryptonową w warunkach określonych w definicji (długość ta wynosi 605,780 210 3 nm), mierzona interferometrycznie,
- z 1987 r.:** $\frac{10^9}{3\,392\,231\,397\,327} = 294\,791,210\,527\,313$ długości fali promieniowania elektromagnetycznego w próżni emitowanej przez laser helowo-neonowy stabilizowany jodem nastrojony cząsteczkami metanu na linię P(7) w paśmie ν_3 (długość ta wynosi 3 392,231 397 327 nm) mierzonej interferometrycznie (taki jest państwowy wzorzec metra w Polsce, znajduje się w GUM),

od 2002 r.: kolejne rekomendowane długości (częstotliwości) fal promieniowania elektromagnetycznego, też laserowego, uzyskiwane dla przejść elektronów między różnymi stanami energetycznymi w różnych atomach, jonach i cząsteczkach, dla których przyjmuje się odpowiednie ich krotności (łącznie jest ich ok. 30), przy czym nie wszystkie z tych fal są falami z zakresu widzialnego – są też wykorzystywane fale z zakresu podczerwonego, nadfioletowego i rentgenowskiego.

Definicja wynika z relacji $c = \frac{l}{t}$, l - długość drogi, jaką światło (fala elektromagnetyczna) pokonuje w próżni w czasie t .

Metoda bezpośrednia z relacji $\Delta l = \frac{c'}{2} \Delta t = \frac{c}{2n} \Delta t$ (c' - prędkość światła w ośrodku o współczynniku załamania światła n ; dla powietrza średnio 1,00028) wymaga mierzenia czasu Δt pomiędzy dojściem do detektora impulsów świetlnych wysyłanych przez źródło.



Metoda interferometryczna – w układzie takim jak poprzednio źródło emituje światło ciągle – strumienie dochodzące do detektora interferują i dają wzmocnienia, gdy różnica dróg pokonywanych przez światło $d = \frac{\lambda}{2}$, λ - długość fali światła określana z zależności $c' = \frac{c}{n} = \frac{\lambda}{nT} = \frac{\lambda}{n} f$, f - częstotliwość światła.

Przesunięcie lustra, dla którego obserwuje się K kolejnych wzmocnień natężenia światła docierającego do detektora (maksimów generowanego w nim sygnału wyjściowego), jest przesunięciem o $D = Kd = K \frac{\lambda}{2}$ – znając długość interferującej fali światła λ (jej częstotliwość wzorcową f i prędkość jej propagacji w danym ośrodku c') wyznacza się długość tego przesunięcia D – aby uzyskać długość 1 m trzeba przesunąć lustro o odległość będącą określoną liczbą połówek długości fali zastosowanego światła biegnącego w określonym ośrodku, np.:

$3\,301\,527,46 = 2 \times 1\,650\,763,73$ dla lampy kryptonowej,

$589\,582,421\,050\,626 = 2 \times 294\,791,210\,525\,313$ dla lasera helowo-neonowego.

METR - wzorce w skali nano- i subnanometrycznej

- dyfrakcja promieniowania rentgenowskiego na siatce z monokryształu kwarcu lub krzemu, o ustalonej i znanej odległości między atomami w tym monokryształu,
- transmisyjna mikroskopia elektronowa cienkich krzemowych płytek monokrystalicznych, dla których znane są odległości między atomami w warunkach próżni panującej w mikroskopie,
- odbiciowa mikroskopia elektronowa do obserwacji wysokości schodków na powierzchni monokryształów krzemu, utworzonych przez nachodzące na siebie warstwy siatki krystalicznej o grubości jednego atomu i o różnych powierzchniach, dla których znane są wysokości tych schodków w warunkach ultrawysokiej próżni panującej w mikroskopie.

KILOGRAM - definicje

- z 1799 r.:** masa 1 dm³ wody destylowanej w temperaturze 4 °C i przy ciśnieniu 760 mmHg,
- z 1889 r.:** masa międzynarodowego wzorca masy jednego kilograma, przechowywanego w Międzynarodowym Biurze Miar w Sevres (definicja oparta o etalon),
- z 1989 r. dodano:** „zaraz po jego czyszczeniu i myciu” (co wynikało z osadzania się na nim zanieczyszczeń, przy czym procedura przeprowadzenia tego czyszczenia i mycia była dokładnie określona w odpowiednim dokumencie),
- od maja 2019 r.:** jednostka masy definiowana przez przyjęcie ustalonej wartości stałej Plancka $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ [J·s = kg·m²/s], gdzie s jest definiowaną sekundą, a m – definiowanym metrem.

$$1 \text{ kg} = \frac{h \left[\text{J} \cdot \text{s} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}} \right]}{6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} \approx 1,475\,521\,4 \times 10^{40} \frac{h \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}} \right] \nu_{133} \text{Cs} \left[\frac{1}{\text{s}} \right]}{c^2 \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right]}$$

Definicja ta sprowadza się do zdefiniowania jednostki kg·m²/s, co dla znanych definicji metra i sekundy daje wyrażenie kilograma przez wartość stałej Plancka.

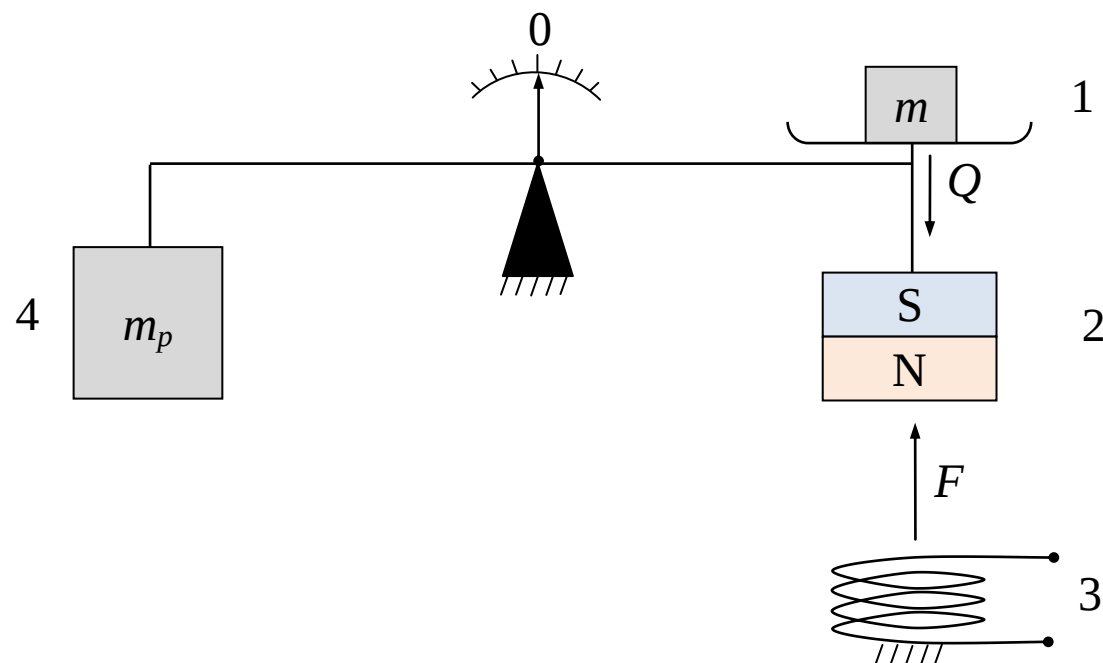
KILOGRAM - wzorce

- z 1799 r.:** walec z czystej platyny (obecnie przechowywany we francuskim Archiwum Państwowym),
- z 1889 r.:** walec ze stopu platyny (90 %) i irydu (10 %) o średnicy i wysokości 39 mm, wskazany w definicji (konkretny obiekt materialny), o masie równej masie jednego kilograma i wszystkie zgodne z nim inne odważniki (w siedzibie BIPM jest przechowywany jeden pierwotny i sześć jego oficjalnych kopii; w sumie wykonano kilkadziesiąt innych ich kopii z przeznaczeniem na wzorce państwowe dla państw-stron Konwencji Metrycznej – odważnik będący państwowym wzorcem kilograma w Polsce ma numer 51 i znajduje się w GUM).

Obecnie wzorcem może być dowolny obiekt (nawet pojedynczy atom) o masie wyznaczonej metodą wykorzystującą stałą Plancka.

nowe propozycje: waga Kibble’a (watowa) lub kule krzemowe

Waga Kibble'a (watowa)



- 1 – badana masa
- 2 – magnes trwały lub elektromagnes (solenoid, w którym płynie prąd generujący pole magnetyczne),
- 3 – nieruchomy solenoid badawczy, w którym płynie prąd I_1 i na którego końcach rejestruje się napięcie U_2 ,
- 4 – przeciwwaga (masa równoważąca statycznie masy talerzyka i magnesu trwałego lub elektromagnesu)

Tryb ważenia: zrównoważenie ciężaru Q masy m badanego przedmiotu w ziemskim polu grawitacyjnym o przyspieszeniu grawitacyjnym g ($Q = mg$) przez siłę elektrodynamiczną F wytwarzaną przez prąd zasilający (z zewnętrznego źródła) I_1 płynący w solenoidzie badawczym o długości obwodu l i generujący pole magnetyczne o indukcji B ($F = I_1 Bl$): $mg = I_1 Bl$; prąd I_1 dobiera się tak, aby języczek wagi ciągle pokazywał „0”.

Tryb ruchu: mierzenie napięcia $U_2 = vBl$ między rozwartymi końcówkami solenoidu badawczego generowanego przez płynący przez ten solenoid zmienny strumień magnetyczny przy opadaniu z prędkością chwilową v nie zrównoważonej masy m w ziemskim polu grawitacyjnym o przyspieszeniu grawitacyjnym g (dla prędkości chwilowej v określonej w pewnej chwili opadania rejestrowane jest chwilowe napięcie U_2).

W efekcie uzyskuje się zależności:

$$mg = I_1 Bl = I_1 \frac{U_2}{v} \Rightarrow mgv = I_1 U_2 \Rightarrow P_{\text{mech}} = P_{\text{elektr}} \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{s}} = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W} = \text{A} \cdot \text{V} \right]$$

(moc mechaniczna jest „wirtualnie” zrównana z mocą elektryczną – prąd I_1 jest mierzony w trybie ważenia, napięcie U_2 w oddzielnym trybie ruchu).

Prąd I_1 określa się z prawa Ohma: $I_1 = \frac{U_1}{R}$, co daje: $mgv = \frac{U_1 U_2}{R} \Rightarrow m = \frac{1}{gv} \frac{U_1 U_2}{R}$ – aby okre-

ślić wartość masy należy dysponować lokalną wartością przyspieszenia ziemskiego g , układem do mierzenia prędkości chwilowych v (długości i czasu) oraz układami do wyznaczania napięcia i rezystancji. Napięcia U_1 i U_2 są mierzone dla warunków występowania zewnętrznego

efektu Josephaona: $U \leftrightarrow \frac{nf}{K_J}$, $K_J = \frac{2e}{h} = 483\,597\,898\,416\,984 \frac{\text{GHz}}{\text{V}}$ - stała Josephaona, h - stała

Plancka, a rezystancja dla warunków występowania kwantowego efektu Halla: $R \leftrightarrow \frac{R_K}{n}$,

$R_K = \frac{h}{e^2} = 25\,812\,807\,459\,304\,5 \, \Omega$ - stała von Klitzinga.

$$m = \frac{1}{gv} \frac{\frac{n_1 f_1}{K_J} \frac{n_2 f_2}{K_J}}{\frac{R_K}{n}} = \frac{1}{gv} \frac{a}{K_J^2 R_K} = \frac{a}{gv} \frac{1}{\frac{4e^2}{h^2} \frac{h}{e^2}} = \frac{a}{gv} \frac{1}{\frac{4}{h}} = \frac{a}{4gv} h$$

Monokrystaliczne kule krzemowe

Z dużych monokryształów izotopu krzemu ^{28}Si wykonuje się prawie idealne kule o średnicach ok. kilkunastu centymetrów (mierzonych interferometrycznie z dokładnością kilku nanometrów) i masach ok. jednego kilograma, określa ich gęstość (odległości między atomami w sieci krystalicznej) metodą XRCD (X-ray-crystal-density) i na podstawie znajomości struktury krystalicznej krzemu (komórka elementarna kryształu krzemu ma kształt sześcianu o krawędzi a i objętości V_0 i tworzy ją 8 atomów) twierdzi, że w takiej kuli o objętości V_S znajduje się

$N = n \frac{V_S}{V_0} = \frac{8V_S}{a^3}$ atomów krzemu ^{28}Si . Masa tej kuli (wzorca wyznaczanej masy) to

$m = Nm_A = Nh \frac{m_A}{h}$, $m_A = \frac{2h}{c} \frac{R_\infty}{\alpha^2} \frac{A_r(A)}{A_r(e)}$ - masa pojedynczego atomu, h - stała Plancka, $\frac{m_A}{h}$ -

współczynnik wyznaczany eksperymentalnie, c - prędkość światła w próżni, R_∞ - stała Rydberga, α - stała struktury, $A_r(A)$ - względna masa atomowa atomu, $A_r(e)$ - względna masa atomowa elektronu.

Wszystkie wzorce wtórne są porównywane z takimi wzorcami pierwotnymi według zwykłych porównań mas, realizowanych np. za pomocą odpowiednich wag szalkowych.

W siedzibie BIPM przechowywanych jest obecnie, w warunkach minimalizujących tempo utraty dokładności, kilkanaście pierwotnych wzorców masy wykonanych jako kule z różnych materiałów.

Aby dopasować nową definicję kilograma (krotność stałej Plancka) do poprzedniej (masa międzynarodowego wzorca masy), wartość stałej Plancka i jej niepewność ustalono na podstawie analizy wszystkich dotychczas opublikowanych i uznawanych jej wartości oraz na podstawie wartości masy dotychczasowego wzorca międzynarodowego. Ostatecznie wybraną wartością jest wartość, dla której masa wzorca międzynarodowego wynosi 1 kg z niepewnością względną 10^{-8} .

W efekcie **międzynarodowy wzorzec masy** i wszystkie jego oficjalne kopie, teraz już jako **wzorce wtórne**, mogą być używane do sprawdzania innych już istniejących i nowo produkowanych kolejnych wzorców wtórnych (odważników), zgodnie z wymogami spójności pomiarowej.

AMPER - definicje

- z 1908 r.:** prąd elektryczny, który płynąc przez wodny roztwór azotanu srebra wydziela na katodzie w ciągu sekundy 0,001 118 grama srebra (definicja elektrochemiczna z czasów, gdy amper nie był jednostką podstawową SI),
- z 1946 r.:** prąd elektryczny niezmienny w czasie, który płynąc w dwóch równoległych, prostoliniowych, nieskończenie długich przewodach o przekroju kołowym znikomo małym, umieszczonych w próżni w odległości 1 metra od siebie, wywołuje między nimi siłę 2×10^{-7} N na każdy metr długości (definicja oparta na prawie Ampera),
- od maja 2019 r.:** jednostka prądu elektrycznego definiowana przez przyjęcie ustalonej wartości ładunku elementarnego $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ [C = A·s], gdzie s jest definiowaną sekundą.

$$1 \text{ A} = \frac{e[\text{C} = \text{A} \cdot \text{s}]}{1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ s}} \approx 6,789\,687 \times 10^8 e[\text{A} \cdot \text{s}] \nu_{133} \text{ Cs} \left[\frac{1}{\text{s}} \right]$$

Definicja ta sprowadza się do tego, że amper jest prądem elektrycznym odpowiadającym przepływowi $\frac{10^{19}}{1,602\,176\,634}$ ładunku elementarnego w czasie sekundy.

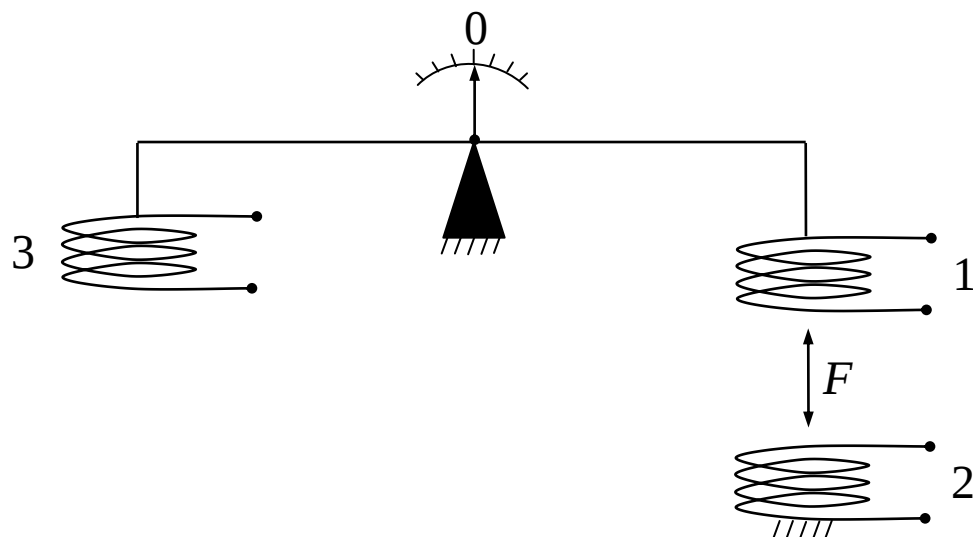
AMPER - wzorce

Historycznie

Waga prądowa wykorzystująca oddziaływania elektrodynamiczne między przewodnikami-solenoidami, przez które płyną odpowiednie prądy elektryczne – wzorzec wynikający bezpośrednio z definicji: jeżeli języczek wagi pokazuje 2×10^{-7} N, to w każdym z solenoidów płynie prąd równy jednemu amperowi. Wzorzec trudny do realizacji.

Zalecana praktyczna realizacja wzorca wykorzystywała **prawo Ohma** – amper wyznaczano na podstawie wzorców wolta i oma, o wiele prostszych do wykonania i, w kontekście odkrycia efektów Josephsona i kwantowego Halla, dających o wiele większą dokładność i powtarzalność.

Waga prądowa



- 1 – ruchomy elektromagnes badawczy (solenoid, w którym płynie prąd I generujący pole magnetyczne)
- 2 – nieruchomy elektromagnes badawczy (solenoid, w którym płynie prąd I generujący pole magnetyczne)
- 3 – przeciwwaga (elektromagnes równoważący statycznie masę ruchomego solenoidu badawczego)

Wartość prądu określa się według siły F oddziaływania elektrodynamicznego dwóch współosiowych solenoidów, w których płyną takie same prądy wzorcowe I . Gdy prądy nie płyną, języczek wagi pokazuje 0 N. Jeżeli języczek wagi pokazuje 2×10^{-7} N, to w każdym z solenoidów płynie prąd równy jednemu amperowi.

AMPER - wzorce

Obecnie (wykorzystanie wartości ładunku elektrycznego)

- stosowanie **urządzeń SET** (*single electron transport*) lub innych podobnych, odtwarzających relację między ładunkiem e o wartości podanej w definicji i sekundą: $A = \frac{C}{s}$ (relację **bezpośrednio** związaną z aktualną definicją ampera); **na razie** urządzenia te nie są tak dopracowane, aby dawać niepewności wymagane przy odtwarzaniu ampera jako jednostki podstawowej SI,
- stosowanie zależności wynikającej z **prawa Ohma**: $I = \frac{U}{R}$ i korzystanie z zależności $A = \frac{V}{\Omega}$ - wiąże się ze stosowaniem wzorców jednostek pochodnych: wolta (wzorca bazującego na zewnętrznym efekcie Josephsona) oraz oma (wzorca bazującego na kwantowym efekcie Halla); metoda **obecnie najczęściej** stosowana,
- stosowanie **kondensatorów** i zależności $I = C \frac{dU}{dt}$, dającej zależność $A = F \frac{V}{s}$ - wiąże się ze stosowaniem wzorców jednostek pochodnych: farada i wolta oraz wzorca jednostki podstawowej – sekundy.

Użytkowe wzorce prądu – kalibratory prądu stałego – elektronicznie sterowane źródła prądu stałego, np. kalibrator 5700A Fluke – źródło prądu o stałych wartościach w zakresie od 220 μA do 2,2 A z rozdzielczością odpowiednio od 0,1 nA do 1 μA .

KELWIN - definicje

z 1954 r.: $\frac{1}{273,16}$ temperatury termodynamicznej punktu potrójnego wody,

w 2005 r. dodano zakończenie: której skład izotopowy charakteryzuje się następującymi stosunkami ilości materii:

0,000 155 76 mola ^2H na jeden mol ^1H ,

0,000 379 9 mola ^{17}O na jeden mol ^{16}O i

0,002 005 2 mola ^{18}O na jeden mol ^{16}O ,

od maja 2019 r.: jednostka temperatury termodynamicznej definiowana przez przyjęcie ustalonej wartości stałej Boltzmanna $k = 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ [J/K = kg}\cdot\text{m}^2/(\text{s}^2\cdot\text{K})]$, gdzie s jest definiowaną sekundą, m – definiowanym metrem, a kg – definiowanym kilogramem.

$$1 \text{ K} = \frac{1,380\,649 \times 10^{-23} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}}{k \left[\frac{\text{J}}{\text{K}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{K}} \right]} \approx 2,266\,665\,3 \times 10^{12} \frac{{}^{\nu}133\text{Cs} \left[\frac{1}{\text{s}} \right] h \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}} \right]}}{k \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{K}} \right]}$$

Definicja ta sprowadza się do tego, że kelwin jest równy zmianie temperatury termodynamicznej towarzyszącej zmianie energii cieplnej $Q = kT$ o $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J}$.

Wzorce temperatury

Pierwotnie kelwin był $\frac{1}{273,16}$ temperatury termodynamicznej punktu potrójnego wody – temperatura termodynamiczna tego punktu, wskazana przez tzw. bezwzględny termometr pierwotny (np. odpowiedni termometr gazowy) zanurzony w szczelnym naczyniu (kalorymetrze) wypełnionym tylko wodą destylowaną o temperaturze i pod ciśnieniem, w których woda jednocześnie jest lodem, cieczą i gazem (parą nasyconą), wynosiła 273,16 K (dla temperatury Celsjusza przyjmuje się wartość 0,01 °C). Stosowane kalorymetry i termometry gazowe pozwalały na uzyskanie niepewności wyznaczania tej temperatury na poziomie 0,1 mK.

Obecnie kelwin jest definiowany przez jednostkę energii (ciepła) – dżul i przyjęcie ustalonej wartości stałej Boltzmanna – współczynnika proporcjonalności między temperaturą termodynamiczną T i energią cieplną Q .

Temperatura termodynamiczna – miara średniej **energii** cieplnej – naturalną jednostką temperatury termodynamicznej jest **dżul** (inne, w tym kelwin, nie są więc potrzebne). Jednak ze względów historycznych i praktycznych, kelwina pozostawiono jako jednostkę podstawową SI, a zalecanym wzorcem temperatury termodynamicznej 273,16 K (temperatury Celsjusza 0,01 °C) jest ciągle kalorymetr z wodą o określonym w 2005 r. składzie izotopowym, utrzymywaną w warunkach występowania jej punktu potrójnego. Istotnie zmienił się sposób mierzenia temperatury.

Wartość temperatury mierzy się za pomocą **termometru pierwotnego** – układu fizycznego do określania temperatury na podstawie pomiarów innych wielkości fizycznych występujących w stosowanym prawie fizycznym (np. w równaniu stanu gazu doskonałego lub w równaniu Plancka). Jest to urządzenie dość skomplikowane, a jego używanie jest czasochłonne – jest więc stosunkowo rzadko stosowane.

Częściej korzysta się z praktycznych skal temperatury, w których określone są wartości temperatury związanej z wybranymi stanami termodynamicznymi (np. krzepnięciem/topnieniem, parowaniem/skraplanie, punktami potrójnymi) różnych substancji (też wody) – są to tzw. punkty stałe temperatury, o wartościach wyznaczonych przez termometrię pierwotną. Praktyczne skale temperatury zawierają też sposoby interpolacji i ekstrapolacji wartości temperatury między i poza wartościami przypisanymi do przyjętych stanów termodynamicznych.

Obecnie dla układu SI obowiązują:

- międzynarodowa skala temperatury ITS-90 (*International Temperature Scale* z 1990 r.) dla temperatury od 0,65 K do najwyższych, jakie można mierzyć termometrami radiometrycznymi,
- tymczasowa skala niskiej temperatury PLTS-2000 (*Provisional Low Temperature Scale* z 2000 r.) dla temperatury od 0,9 mK do 1 K, przy czym punkty stałe poniżej 10 mK nie są jednoznaczne (różne laboratoria uzyskują różne ich wartości dla tych samych stanów termodynamicznych).

Dla temperatury w zakresie od 0,65 do 1 K można korzystać z obu skal, odpowiednio do wygody, możliwości i pożądanej niepewności uzyskiwanego wyniku.

Termometria pierwotna wykorzystuje:

- **równanie stanu gazu:** $pV = nRT \left(1 + B(T) \frac{n}{V} + \dots \right)$, p - ciśnienie, T – temperatura n moli gazu zajmującego objętość V , $R = N_A k$ - molowa stała gazowa, N_A - stała Avogadro, B - współczynnik korekcyjny dla danego gazu;
- **akustyczną termometrię gazową** – zależność między prędkością dźwięku u w gazie i temperaturą termodynamiczną T : $u^2 = \frac{\gamma k T}{m}$, k - stała Boltzmana, m – średnia masa cząsteczkowa gazu, $\gamma = \frac{c_P}{c_V}$ - stosunek ciepeł właściwych gazu przy stałym ciśnieniu i przy stałej objętości;
- **radiometryczną termometrię widmową** (dla temperatury przekraczającej 1235 K) – prawo Plancka promieniowania fal elektromagnetycznych przez ciała doskonale czarne o temperaturze termodynamicznej T : moc promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez jednostkę powierzchni ciała doskonale czarnego w jednostkowy kąt bryłowy przypadająca na jednostkę długości fali tego promieniowania wynosi $\varepsilon_{\lambda T} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1}$, k - stała Boltzmana, h - stała Plancka, λ - długość fali promieniowania w próżni, c - prędkość światła w próżni;

– **polaryzacyjną termometrię gazową** – pomiar gęstości gazu na podstawie jego właściwości elektromagnetycznych i równań Clausiusa-Mossotti’ego: $\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{A_\varepsilon p}{RT}$ i Lorentza-Lorenza:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{(A_\varepsilon + A_\mu)p}{RT},$$

ε_r - względna przenikalność elektryczna gazu, n - współczynnik załamania światła gazu, A_ε - molowa polaryzacja elektryczna, A_μ - molowa polaryzacja magnetyczna, p - ciśnienie gazu, R - stała gazowa; termometria w funkcji ε_r jest realizowana za pomocą pomiaru pojemności kondensatora z gazem jako dielektrykiem (DCGT – *Dielectric-constant Gas Thermometry*), a termometria w funkcji n jest realizowana za pomocą detekcji rezonansów fal elektromagnetycznych w rezonatorze wnękowym wypełnionym gazem (RIGT – *Refractive-index Gas Thermometry*);

– **termometrię szumu Johnsona** (JNT – *Johnson Noise Thermometry*) – opis chaotycznego termicznego ruchu ładunków w przewodniku: gęstość widmowa mocy napięcia takiego szumu mierzonego na zespolonej impedancji Z (jeśli impedancją tą jest rezystancja to Z jest

rzeczywista i równa R) jest równa
$$L_U(f, T) = 4hf \operatorname{Re}(Z(f)) \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}}} \right),$$
 f - częstotliwość

danej składowej harmoniczej napięcia szumu, h – stała Plancka, k - stała Boltzmannna.

Najczęściej temperaturę mierzy się wykorzystując praktyczne skale temperatury i określone w nich punkty stałe temperatury. Wartości temperatury tych punktów stałych wyznacza się stosując proste termometry skalibrowane odpowiednio do tych skal. Obecnie najbardziej precyzyjne pomiary temperatury w zakresie od -250 do $+960$ °C wykonuje się metalowymi termometrami oporowymi, wykorzystującymi zależność ich rezystancji od ich temperatury (takim popularnym termometrem jest termometr platynowy, np. Pt-100).

Użytkowymi wzorcami temperatury w Polsce są układy pomiarowe składające się z komórek do realizacji punktów stałych temperatury (kalorymetrów z termostatem i kriostatem) oraz mostka prądu elektrycznego zmiennego z termometrami rezystancyjnymi i opornikami wzorcowymi (znajdują się w GUM dla temperatur od 83,8 do 1235 K i w Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN dla temperatur od 13,8 do 273,16 K).

MOL - definicje

z 1971 r.: ilość (liczność) materii występująca gdy liczba cząsteczek tej materii jest równa liczbie atomów zawartych w masie 0,012 kg izotopu węgla ^{12}C (liczba ta jest równa liczbie Avogadro, określanej wtedy na $6,022\,93 \times 10^{23}$ – tyle sztuk cząsteczek składa się na 1 mol danej substancji); przy stosowaniu mola należy określić rodzaj cząsteczek, którymi mogą być: atomy, cząsteczki, jony, elektrony, inne cząstki lub określone zespoły takich cząstek,

od maja 2019 r.: jednostka ilości materii występująca gdy liczba obiektów elementarnych tej materii jest równa liczbie $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$, nazywanej liczbą Avogadro; liczba ta określa stałą Avogadro $N_A = 6,022\,140\,76 \times 10^{23}/\text{mol}$; przy stosowaniu mola należy określić rodzaj obiektów elementarnych, którymi mogą być: atomy, cząsteczki, jony, elektrony, inne cząstki lub określone zespoły takich cząstek.

$$1 \text{ mol} = \frac{6,022\,140\,76 \times 10^{23}}{N_A \left[\frac{1}{\text{mol}} \right]}$$

MOL - wzorce

dla pierwszej definicji: 12 gramów czystego izotopu węgla ^{12}C , a w zasadzie liczba atomów tego węgla składająca się na masę równą 12 gramom,

obecnie: dowolny eksperyment, w którym wykorzysta się wartości ze zbioru wartości liczbowych występujących w nowych definicjach podstawowych jednostek miar, przy czym kluczowe znaczenie ma stała Avogadro, jako bezpośrednio występująca w definicji mola.

Ilość (liczba moli) substancji X w czystej próbce tej substancji (zawierającej atomy tylko jednego izotopu określonego pierwiastka lub cząsteczki tylko jednego związku chemicznego tworzonego tylko przez atomy określonych izotopów pierwiastków je tworzących): $n = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M(X)}$

N – liczba obiektów elementarnych substancji X zawartych w próbce,

N_A – stała Avogadro,

m – masa N obiektów elementarnych substancji X zawartych w próbce (masa próbki),

$M(X) = N_A m(X) = N_A A_r(X) m_u = A_r(X) M_u$ – masa molowa substancji X ,

$m(X)$ – masa pojedynczego obiektu elementarnego substancji X ,

$A_r(X)$ – względna masa atomowa (cząsteczkowa) substancji X ,

$m_u \frac{m(^{12}\text{C})}{12} = \frac{2h}{c} \frac{R_\infty}{\alpha^2 A_r(e)}$ – masa atomowa (1/12 masy spoczynkowej atomu izotopu ^{12}C

w stanie podstawowym, h - stała Plancka, c - prędkość światła w próżni, R_∞ - stała Rydberga, α - stała struktury, $A_r(e)$ - względna masa atomowa elektronu),

$M_u = N_A m_u$ – masa molowa.

Praktyczne realizacje mola danej substancji X :

- metody rentgenograficzne, np. (XRCD): np. monokrystaliczna kula krzemu, której komórki elementarne są sześciánami o krawędzi a , o makroskopowej objętości V_S zawiera $N = \frac{8V_S}{a^3}$ atomów, czyli $n = \frac{N}{N_A} = \frac{8V_S}{a^3 N_A}$ moli krzemu;
- wyznaczanie liczby N obiektów elementarnych substancji X lub jej ilości n w próbce o masie m , w której udział masowy badanej substancji wynosi $w(X)$: $N = w(X) \frac{m}{m(X)} = \frac{w(X)}{A_r(X)} \frac{m}{m_u}$ i $n = w(X) \frac{m}{M(X)} = \frac{w(X)}{A_r(X) N_A m_u} m = \frac{w(X)}{A_r(X) M_u} m$; metoda powszechnie stosowana, bo dla znanego $w(X)$ wymaga tylko wyznaczenia masy całkowitej próbki (pozostałe dane są tabelaryzowane);
- wykorzystanie równania stanu gazu: $pV = nRT \left(1 + B(T) \frac{n}{V} + \dots \right)$, p - ciśnienie, T - temperatura gazu zajmującego objętość V , R - molowa stała gazowa, B - współczynnik korekcyjny dla danego gazu;

- elektroliza – liczba obiektów elementarnych N reagujących na elektrodzie jest proporcjonalna do wydzielonego ładunku Q : $N = \frac{Q}{ze}$, z - liczba elektronów (jonów), które przereagowały,
 e - ładunek elementarny; odpowiednio $n = \frac{Q}{zeN_A} = \frac{Q}{zK_F}$, $K_F = N_A e$ - stała Faradaya.

Etalonami ilości substancji w Polsce, w GUM, są układy:

- precyzyjnych nieautomatycznych wag elektronicznych i wzorców masy, do wyznaczania mas badanych substancji;
- do analiz kulometrycznych, wykorzystujących elektrolizę badanych substancji;
- do chromatografii jonowej badanych substancji (jednej z metod chromatograficznych; eksperyment niewymieniony w dokumentach BIPM, ale wg polskiej administracji miar o niepewności wyznaczania mola wystarczającej dla polskiego wzorca państwowego).

Częścią wszystkich tych etalonów są odpowiednie materiały odniesienia służące do kontrolnego odtwarzania konkretnych wartości ilości różnych substancji.

KANDELA - definicje

z 1946 r.: $\frac{1}{60}$ luminancji (wizualnej jasności), jaką ma powierzchnia 1 cm^2 promiennika zupełnego w temperaturze topniejącej platyny,

z 1968 r.: światłość, jaką ma w kierunku prostopadłym powierzchnia $\frac{1}{600\,000} \text{ m}^2$ ciała doskonale czarnego w temperaturze topniejącej platyny pod ciśnieniem 101325 N/m^2 (tj. jednej atmosfery fizycznej),

z 1979 r.: światłość, jaką ma w określonym kierunku źródło emitujące światło monochromatyczne o częstotliwości $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ (czyli dla prędkości światła w próżni długość 555 nm – kolor zielony, na który przeciętne ludzkie oko jest najczulsze) i którego natężenie w tym kierunku jest równe $\frac{1}{683} \frac{\text{W}}{\text{sr}}$,

od maja 2019 r.: jednostka światłości w określonym kierunku definiowana przez przyjęcie ustalonej wartości skuteczności świetlnej $K_{cd} = 683 \text{ [lm/W = cd}\cdot\text{sr/W = cd}\cdot\text{s}^3/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)]$ źródła emitującego promieniowanie (światło) monochromatyczne o częstotliwości $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$, gdzie s jest definiowaną sekundą, m – definiowanym metrem, kg – definiowanym kilogramem, a sr = m^2/m^2 jest steradianem.

$$1 \text{ cd} = \frac{K_{cd} \left[\frac{\text{lm}}{\text{W}} = \frac{\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{s}}{\text{J}} = \frac{\text{cd} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{m}^2} \cdot \text{s}^3}{\text{kg} \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{cd} \cdot \text{s}^3}{\text{kg} \cdot \text{m}^2} \right]}{683 \frac{\text{s}^3 \cdot \text{sr}}{\text{kg} \cdot \text{m}^2}} \approx$$

$$\approx 2,614 \ 830 \ 5 \times 10^{10} K_{cd} \left[\frac{\text{cd} \cdot \text{s}^3}{\text{kg} \cdot \text{m}^2} \right] \nu_{133}^2 \text{Cs} \left[\frac{1}{\text{s}^2} \right] h \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

Definicja ta sprowadza się do tej z 1979 r.

KANDELA - wzorce

Dla pierwszych definicji – rurka ze stopionym tlenkiem toru znajdująca się wewnątrz bloku topniejącej platyny (1769 °C) pod ciśnieniem normalnym, podgrzewanej prądami indukcyjnymi wywołanymi polami elektromagnetycznymi wielkiej częstotliwości wytwarzanymi przez zewnętrzną cewkę, przez którą płynęły przemienne prądy o odpowiedniej częstotliwości – w takiej temperaturze ściany rurki świecą, a światło emitowane wzdłuż osi tej rurki przez otwór

o powierzchni $\frac{1}{600\,000}\text{m}^2$ miało światłość 1 cd, jeżeli jego natężenie mierzone w kącie bryłowym 1 sr miało energię $\frac{1}{683}\text{W}$.

Obecnie źródło światła może być dowolne, o ile skuteczność świetlna emitowanego promieniowania (światła) monochromatycznego o częstotliwości 540×10^{12} Hz (zielonego) wynosi $K_{cd} = 683 \text{ lm/W}$ – kandela jest definiowana tylko dla jednej wartości częstotliwości promieniowania elektromagnetycznego, z zakresu widzialnego przez człowieka. Kandela jest jednostką wielkości fotometrycznej.

Fotometria – sposób mierzenia światła, którego wynik jest odpowiedni do odczucia jasności przez człowieka widzącego to światło.

Wszystkie techniczne sposoby mierzenia światła („widzenia” przez przyrządy pomiarowe – detektory promieniowania elektromagnetycznego) nazywa się ogólnym pojęciem **radiometria**.

Większość źródeł światła emituje całe spektrum promieniowania elektromagnetycznego, złożone ze składowych o wielu częstotliwościach, które ludzkie oko (lub inny detektor) widzi jednocześnie. Jasność świecenia przez źródło promieniowania o różnych częstotliwościach określa się za pomocą tzw. **funkcji widmowej względnej wydajności świetlnej**.

Czułość ludzkiego oka jest największa na światło zielone i stopniowo spada dla światła o częstotliwościach coraz mniejszych i coraz większych – nie widzimy promieniowania o częstotliwościach mniejszych od widzianego jako światło czerwone (podczerwone, mikrofalowego i radiowego) i o częstotliwościach większych od widzianego jako światło fioletowe (nadfioletowego, rentgenowskiego i gamma).

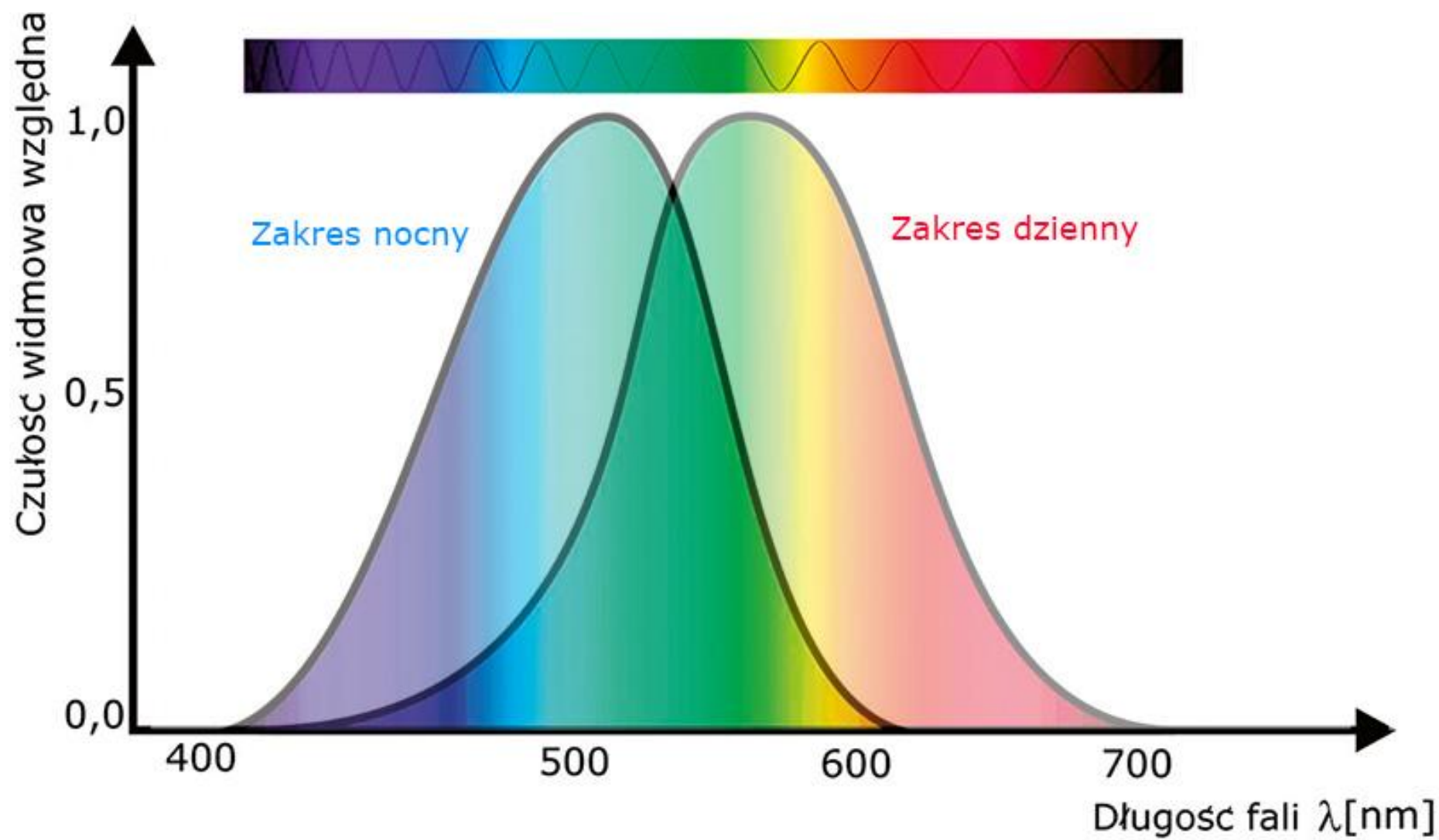
Przebieg **względnej czułości oka przeciętnego zdrowego człowieka** $V(\lambda)$ jest znany z fizjologii i publikowany przez Międzynarodową Komisję do spraw Oświetlenia (CIE – *Commission Internationale de l'Eclairage*) w funkcji długości fali $\lambda = \frac{c'}{f} = \frac{c}{nf}$, f - częstotliwość, c' - prę-

kość fali światła w ośrodku o współczynniku załamania światła n (dla powietrza standardowego średnio ok. 1,00028 w całym zakresie widzialnym ($n(\lambda)$ jest różne dla różnych λ)). Dla definicyjnej częstotliwości $f = 540 \times 10^{12}$ Hz i dla powietrza standardowego $\lambda_a \approx 555,017$ nm.

CIE zdefiniowała trzy takie funkcje:

- fotopową (widzenia dziennego; czopki), z maksimum dla $\lambda = 555$ nm (światło zielone),
- skotopową (widzenia nocnego; pręciki), z maksimum dla $\lambda = 507$ nm (światło niebieskie),
- mezopową (widzenia w półmroku), z maksimum dla λ między określonymi powyżej, dla fal o długości z zakresu od 360 (już w nadfiolecie) do 830 (już w podczerwieni) nm z krokiem co 1 nm.

Definicje jednostek fotometrycznych (kandeli i pochodnych: lumena, luksa, nita itd.) formułuje CIPM i zatwierdza CGPM, a CIE określa standardowe funkcje widmowe względnej czułości oka $V(\lambda)$.



Wzorzec kandeli to zespół źródło-detektor odpowiednio rozmieszczonych względem siebie.

Wychodząc od **detektora**: radiometr absolutny to przyrząd określający ilość padającego na niego światła przez porównanie z innym mierzalnym zjawiskiem fizycznym (zwykle sprowadza się to do mierzenia wielkości elektrycznych). Wykorzystuje się:

- wpływ cieplny promieniowania oświetlającego źródło elektryczne, schłodzone do temperatury kriogenicznej (poniżej 20 K), na jego moc elektryczną,
- fotodiody półprzewodnikowe o znanej wydajności kwantowej wewnętrznego zjawiska fotoelektrycznego (konwersji fotonów na nośniki prądu).

Wychodząc od **źródła** światła, źródło bezwzględne to źródło, dla którego ilość emitowanego przez nie światła można wyznaczyć na podstawie innych wielkości fizycznych. Takimi źródłami mogą być:

- promiennik Plancka – wnęka, która emituje światło i dla której można wyznaczyć wartość jej światłości na podstawie jej temperatury termodynamicznej i prawa promieniowania Plancka,
- pierścień akumulacyjny z elektronami uwięzionymi w polu magnetycznym i poruszającymi się z prędkościami bliskimi prędkości światła, emitujący promieniowanie synchrotronowe, dla którego widmową intensywność promieniowania można obliczyć na podstawie parametrów tego pierścienia (np. geometrycznych) i ilości uwięzionych elektronów.

Można też budować wzorce zliczające fotony (fotopowielacze, jednofotonowe diody lawinowe, nadprzewodzące detektory nanoprzewodowe) i przeliczać wartości oparte na liczbie fotonów na wartości radiometryczne, a te na fotometryczne.

Obecnie najczęstszą realizacją jednostek fotometrycznych, w tym kandeli, są standardowe lampy żarowe, których włókno żarowe (źródło światła) jest małe w stosunku do odległości między nim i otworem wejściowym do układu detektora – pozwala to na uznanie go za źródło punktowe w kierunku do detektora.

Dla danego materiału włókna (najczęściej wolframu) parametry elektryczne pracy źródła są dobierane tak, aby charakterystyka widmowa emitowanego światła była zbliżona do definiowanej przez CIE jako standardowe źródło światła typu A (o charakterystyce widmowej promienika Plancka pracującego przy temperaturze ok. 2856 K).

Płaszczyzna otworu wejściowego do detektora jest prostopadła do kierunku świecenia źródła światła. Dla takiej konfiguracji geometrycznej układu optycznego wzorca, natężenie promieniowania w kierunku od punkтового źródła do kołowego otworu wejściowego detektora

o powierzchni A wynosi $I_e = \frac{\Phi_e}{\Omega}$, $\Omega = \frac{A}{r^2}$ - przybliżenie kąta bryłowego (sr) dla dużych odległości r między otworem detektora i źródłem, Φ_e - strumień promieniowania (W) wytwarzany przez źródło i wysyłany w otwór detektora.

Światłość źródła I_V jest obliczana ze wzoru $I_V = \frac{K_{cd}}{V(\lambda_a)} \int_{\lambda} I_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda$, I_e - natężenie światła

zmierzonego przez detektor (W/sr), $V(\lambda)$ - bezwymiarowa funkcja widmowa względnej czułości oka, λ_a - długość fali promieniowania dla jego częstości określonej w definicji kandeli, K_{cd} – stała definicyjna (lm/W).

Użytkowe wzorce światłości w Polsce w GUM – 5 fotometrycznych lamp żarowych firmy Toshiba typu T64 o wartości nominalnej napięcia elektrycznego 100 V i mocy 200 W.

Użytkowe wzorce strumienia świetlnego w Polsce w GUM – 5 fotometrycznych lamp żarowych firmy Toshiba typu PS95 o wartości nominalnej napięcia elektrycznego 100 V i mocy 200 W.

Definicje jednostek kątów

Radian – kąt zawarty między dwoma promieniami koła i wycinający z jego okręgu łuk o długości równej promieniowi tego okręgu – stanowisko do odtwarzania kąta przez podział kąta pełnego; w Polsce w GUM.

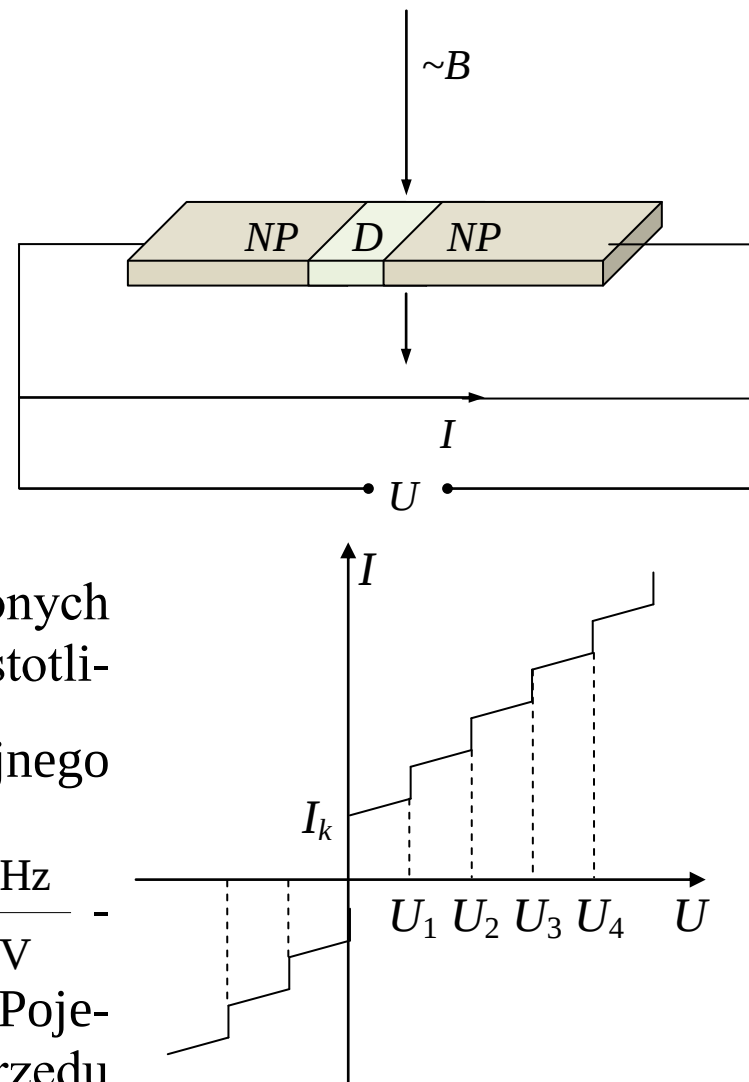
Steradian – kąt stożkowy o wierzchołku w środku kuli i wycinający z jej powierzchni (tj. ze sfery) część (tj. część o obwodzie kołowym) o powierzchni równej powierzchni kwadratu o boku równym promieniowi tej kuli.

Wzorzec wolta wykorzystuje **zewnętrzny efekt Josephsona** występujący w złączu Josephsona (dwa nadprzewodniki rozdzielone cienką ($\sim 10^{-10}$ m) warstwą dielektryka w temperaturze ciekłego helu przy ciśnieniu normalnym (poniżej 4,2 K)). Umieszczenie złącza spolaryzowanego stałym napięciem w oscylacyjnie zmiennym polu magnetycznym o wielkiej częstotliwości, np. polu elektromagnetycznym o częstotliwości f (np. mikrofalowym), powoduje, że zależność prądu płynącego przez złącze w funkcji napięcia polaryzującego przybiera kształt schodkowy. Skoki prądu występują dla ściśle określonych wartości napięcia polaryzującego zależnych liniowo od częstotliwości zmian pola magnetycznego: $U_n = \frac{nf}{K_J}$ (n - numer kolejnego

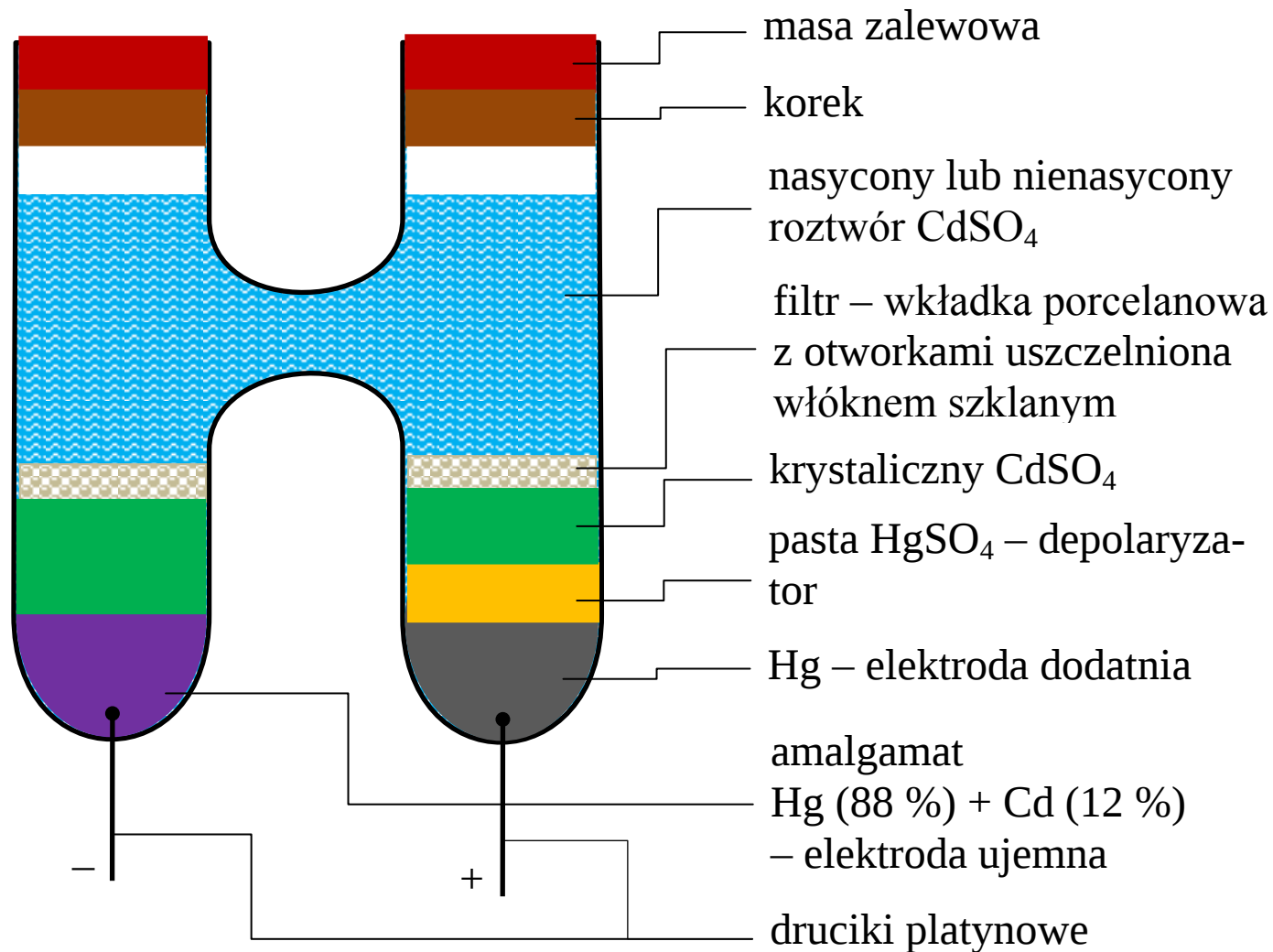
schodka (liczba całkowita), $K_J = \frac{2e}{h} = 483\,597,898\,416\,984 \frac{\text{GHz}}{\text{V}}$ -

stała Josephsona, e - ładunek elektronu, h - stała Plancka). Pojedyncze złącze Josephsona daje wartości napięć wzorcowych rzędu

μV lub mV – we wzorcach stosuje się zestawy złącz w postaci układów scalonych zawierających do 20000 odpowiednio połączonych złącz. Na wyjściu takiego wzorca można uzyskać ok. 150000 wartości napięcia stałego w zakresie od -10 do $+10$ V. Wzorce napięcia wykorzystujące efekt Josephsona są bardzo kosztowne, choć poza tym obecnie dość łatwe do realizacji (taki jest państwowy wzorzec w Polsce, w GUM).



Ogniwo normalne Westona, z elektrolitem – ciekłym nasyconym roztworem CdSO_4 i elektrodami – jedną z amalgamatu $\text{Hg}+\text{Cd}$, drugą z Hg . Ogniwo z roztworem nasyconym w temperaturze $+20\text{ }^\circ\text{C}$ daje $\text{SEM} = (1,01854 \div 1,01873)\text{ V}$, zależnie od czystości materiałów konstrukcyjnych. Współczynnik temperaturowy ogniwa wynosi zaledwie $\sim 40 \frac{\mu\text{V}}{\text{K}}$, a dryft czasowy w ciągu roku $\sim 1\text{ }\mu\text{V}$. Po pobraniu z ogniwa energii równoważnej prądowi $20\text{ }\mu\text{A}$ w ciągu 3 minut (np. w celu wzorcowania etalonów wtórnych), trzeba czekać ok. 1 h, aby SEM się odtworzyło z dokładnością $\pm 10\text{ }\mu\text{V}$ (tzn. aby stan roztworu i elektrod wrócił do stanu sprzed obciążenia ogniwa). Ogniwa z roztworem nienasyconym w temperaturze $+20\text{ }^\circ\text{C}$ dają $\text{SEM} = (1,018 \div 1,020)\text{ V}$. Współczynnik temperaturowy tych ogniw ma wartość poniżej 0,01 % dla temperatur w zakresie $10 \div 40\text{ }^\circ\text{C}$.



Użytkowe wzorce napięcia – kalibratory napięcia stałego, wykorzystujące charakterystyki prądowo-napięciowe elementów półprzewodnikowych (wyselekcjonowane diody Zenera), np. źródło napięcia 732B Fluke – źródło napięć o stałych wartościach 10 V lub 1,018 V z zerowym współczynnikiem temperaturowym w zakresie temperatur 18÷28 °C lub kalibrator 5700A Fluke – źródło napięć o stałych wartościach 220 mV (z rozdzielczością 10 nV), 2,2 V, 22 V, 220 V, 11 V i 1 100 V.

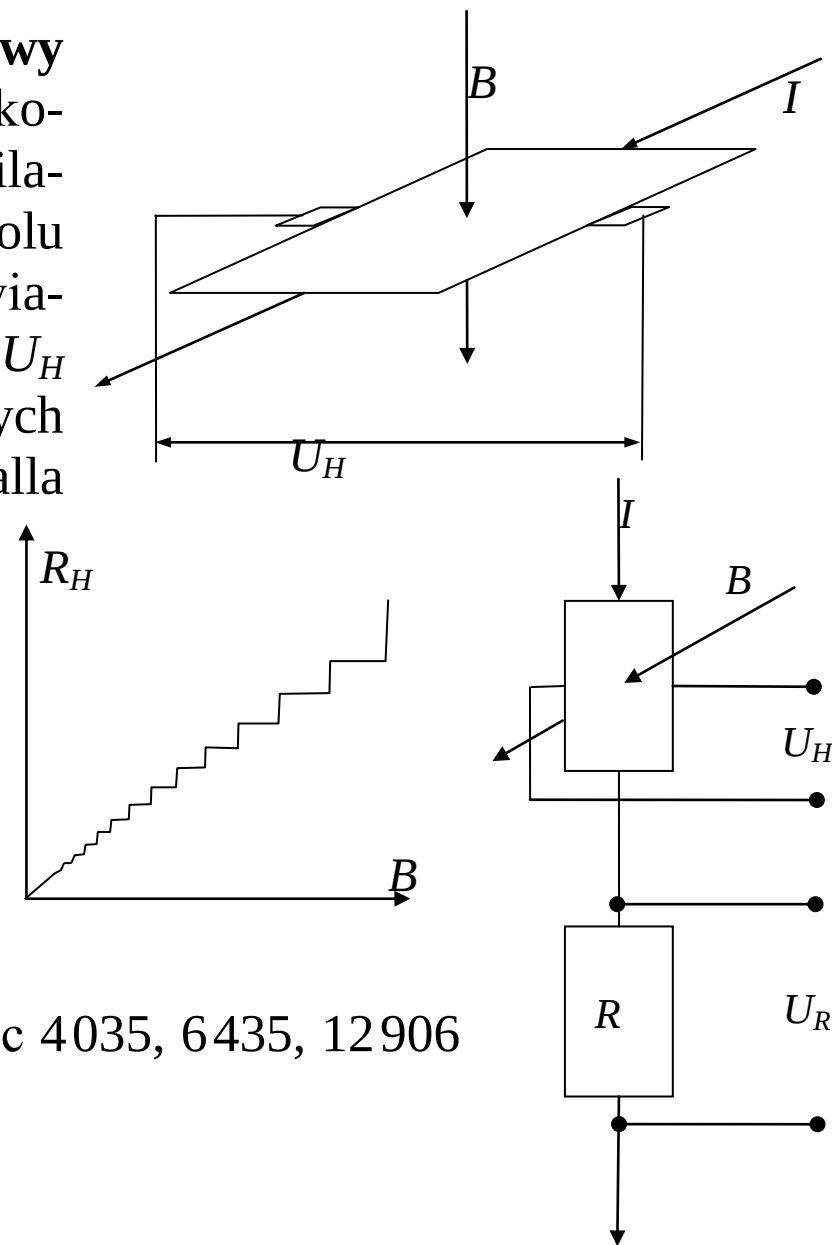
Wzorzec oma dla rezystancji wykorzystuje **kwantowy efekt Halla**, występujący w płytkach półprzewodnikowych ochłodzonych do temperatury poniżej 1 K, zasilanych prądem stałym I i umieszczonych w silnym polu magnetycznym o indukcji B (rzędu kilku tesli), objawiający się schodkowym wzrostem napięcia Halla U_H i rezystancji Halla R_H w funkcji tej indukcji (w pewnych granicach wartości indukcji napięcie i rezystancja Halla są stałe), przy czym rezystancja Halla:

$$R_H = \frac{U_H}{I} = \frac{R_K}{n} \quad (n - \text{numer kolejnego schodka (liczba naturalna)}, \quad R_K = \frac{h}{e^2} = 25\,812,807\,459\,304\,5\,\Omega -$$

stała von Klitzinga). Określenie rezystancji wzorców wtórnych odbywa się w układzie pokazanym obok,

dla którego $R = R_H \frac{U_R}{U_H}$ (taki jest państwowy wzorzec 4035, 6435, 12906

i 20175 Ω w Polsce, w GUM).



Wzorce oma uzyskiwane metodami mostkowymi – porównuje się nieznana rezystancję ze znanymi rezystancjami oporników wzorcowych lub impedancjami kondensatorów wzorcowych, przy czym dla tych ostatnich wykonuje się to dla przyjętej wartości przenikalności elektrycznej próżni $\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2}$.

Użytkowe wzorce rezystancji – bardzo starannie wykonane rezystory normalne (dla pojedynczych wartości rezystancji) (taki jest państwowy wzorzec 1Ω w Polsce, w GUM) lub dekadowe (dla wielu wartości rezystancji). Są one wykonane ze specjalnych stopów, których rezystywność w niewielkim stopniu zależy od temperatury, np.:

- manganin: 84 % Cu, 12 % Mn, 4 % Ni: $\rho = 0,42 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ ze wsp. temp. $(0,5 \div 2) \times 10^{-5} \frac{1}{K}$
- konstantan: 58 % Cu, 41 % Ni, 1 % Mn: $\rho = 0,5 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ ze wsp. temp. $0,5 \times 10^{-5} \frac{1}{K}$
- nikrothal: $\rho = 1,33 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ ze wsp. temp. $10^{-5} \frac{1}{K}$
- evanohm: 74 % Ni, 20 % Cr, 6 % Fe+Al: $\rho = 1,2 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ ze wsp. temp. $\sim 0 \frac{1}{K}$

Wzorzec kulomba można zrealizować w oparciu o:

- pomiar prądu płynącego przez określony czas, z relacji definiującej ampera: $C = A \cdot s$,
- określenie ładunku elektrycznego zgromadzonego w kondensatorze wzorcowym o znanej pojemności wyrażonej w faradach z zależności $C = F \cdot V$, przez pomiar napięcia między okładzinami tego kondensatora realizowany w oparciu o zewnętrzny efekt Josephsona,
- wykorzystanie urządzenia SET lub podobnego i przesyłanie znanej wartości ładunku (np. określonej w definicji ampera) przez określony element obwodu elektrycznego.

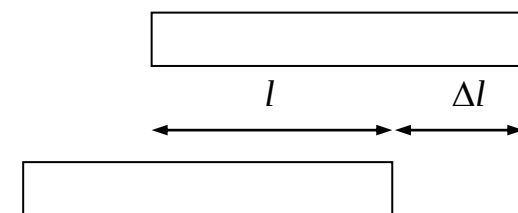
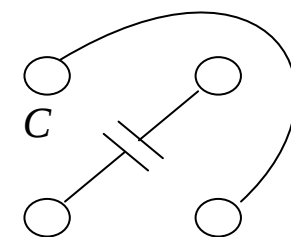
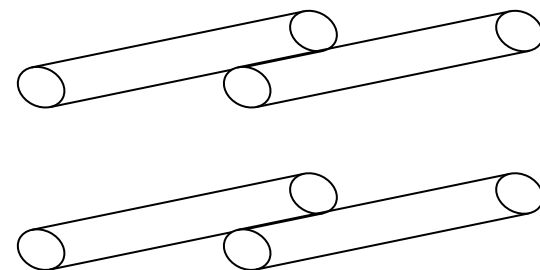
Wzorzec farada

– porównanie impedancji badanej pojemności z impedancją znanej rezystancji, uzyskanej w oparciu o kwantowy efekt Halla, np. metodami mostkowymi,

– wzorzec liczalny – pojemność jest obliczana na podstawie wzoru znanego z elektrostatyki. Fizycznie wzorzec stanowią 4 metalowe pręty ustawione osiami równoległe i zamknięte w ekranie. Pręty te parami na krzyż stanowią kondensatory. Jeżeli jedną z tych par zewrze

się, to pojemność drugiej wynosi $C = \epsilon_0 \frac{\ln 2}{\pi} l = \frac{10^{-7} \ln 2}{4\pi^2 c^2} l$ (l – długość

czynna kondensatora). Zmiany długości l uzyskuje się poprzez poosiowe przesuwanie jednego z prętów kondensatora. Wartość tego przesunięcia mierzy się interferometrem Fabrygo-Perota z wykorzystaniem lasera helowo-neonowego.



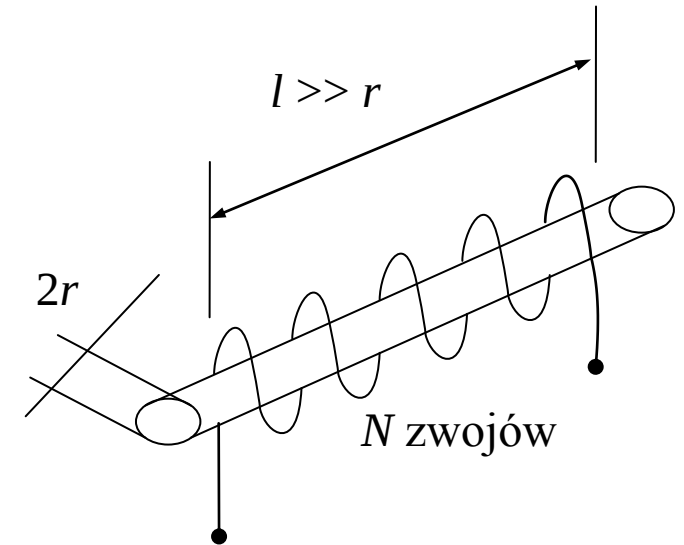
Użytkowe wzorce pojemności – bardzo starannie wykonane kondensatory stałe i regulowane, zwykle płaskie z powietrzem, kwarcem, miką lub styropianem jako dielektrykiem (taki jest państwowy wzorzec w Polsce, w GUM). Łącząc takie kondensatory otrzymuje się kondensatory dekadowe.

Wzorzec henra

– porównanie impedancji badanej indukcyjności z impedancją znanej pojemności (wzorcem farada) i rezystancji (wzorcem oma), np. metodami mostkowymi,

– wzorzec liczalny – indukcyjność jest obliczana na podstawie wzoru znanego z magnetyzmu. Fizycznie wzorzec stanowi cewka o długości l i o N zwojach z drutu jednorodnego o stałej średnicy, nawinięta równomiernie na walcu o promieniu $r \ll l$ wykonanym z materiału izolacyjnego. Indukcyjność takiej cewki

$$\text{wynosi } L = \mu_0 \frac{\pi N^2 r^2}{l}.$$

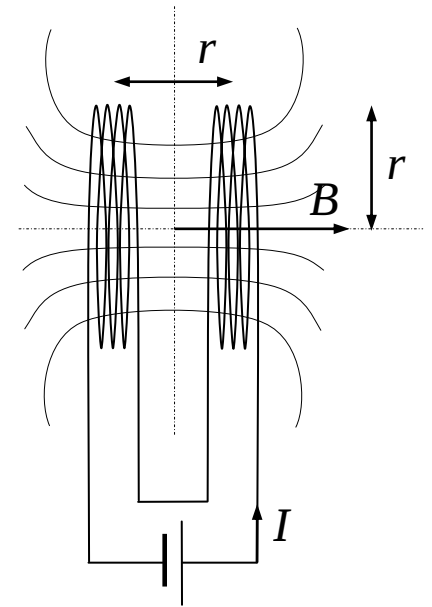


Użytkowe wzorce indukcyjności – bardzo starannie wykonane cewki nawinięte na walcach z materiałów o minimalnym współczynniku rozszerzalności temperaturowej (np. z marmuru, porcelany, kwarcu), zaś drutem jest tzw. lica miedziana izolowana – przewód skręcany z wielu cienkich drutów izolowanych emalią lub jedwabiem (taki jest państwowy wzorzec w Polsce, w GUM).

Wzorzec tesli

- stosowanie elektromagnesów – solenoidów o ściśle określonych geometrycznych konfiguracjach przewodów, przez które płynie ściśle określony prąd elektryczny; np. w środku obszaru wyznaczonego przez cewki Helmholtza o N zwojach indukcja magnetyczna wywołana przepływem

prądu I jest prawie jednorodna i wynosi $B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \mu_0 \frac{NI}{r}$,



- stosowanie jądrowego rezonansu magnetycznego (NMR – *nuclear magnetic resonance*) dla próbki o znanym współczynniku żyromagnetycznym (np. sferycznej kropli czystej wody w temperaturze 25 °C dla przyjętej wartości ekranowanego współczynnika żyromagnetycznego protonu).

Wzorzec webera

- stosowanie wzorców tesli i metra lub wolta i sekundy i stosowanie zależności: $\text{Wb} = \text{T} \cdot \text{m}^2$ lub $\text{Wb} = \text{V} \cdot \text{s}$,
- wykorzystanie kwantowości strumienia magnetycznego w nadprzewodnikach – „kwant” Φ_0 strumienia magnetycznego jest związany ze stałą Plancka h i ładunkiem elementarnym e zależnością $\Phi_0 = \frac{h}{2e}$.

Inne polskie wzorce państwowe

przewodność elektryczna właściwa elektrolitów – układ pomiarowy zawierający utrzymywane w stałej temperaturze naczynie konduktometryczne, urządzenie do precyzyjnego ustawiania elektrod, mostkowy układ do pomiaru impedancji, precyzyjny termometr oraz odpowiednie materiały odniesienia (w GUM)

moc prądu elektrycznego przemiennego – układ pomiarowy zawierający multimetry, boczniki, źródła napięciowe i prądowe oraz wzorcowe liczniki energii elektrycznej (w GUM)

współczynnik załamania światła (formalnie bezwymiarowy) – stanowisko złożone z spektrometru-goniometru UV-VIS-IR, zestawu pryzmatów oraz przyrządów i urządzeń pomocniczych (w GUM)

kąt (płaski) skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła w zakresie widzialnym – zespół pięciu płytek kwarcowych (w GUM)

pH – zestaw utrzymywanych w stałej temperaturze ogniów wodorowo-chlorosrebrowych bez przenoszenia jonów, przyrządów do pomiaru siły elektromotorycznej i materiałów odniesienia (w GUM)

gęstość – monokryształy krzemu: prostopadłościenny WASO 9.2 o wymiarach $(28 \times 39 \times 60)$ mm i masie 153 g oraz kulisty SILO2 o średnicy 94 mm i masie 997,3 g (w GUM)

aktywność promieniotwórcza radionuklidów – dwa rodzaje źródeł promieniowania (bliżej nieokreślone) (w Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Izotopów POLATOM w Otwocku-Świerku)

lepkość kinematyczna – komplet wiskozymetrów kapilarnych szklanych typu Ubbelohde o równomiernie rosnących średnicach, precyzyjnych termometrów, łaźni wiskozymetrycznej oraz wzorcowej wody o znanych wartościach lepkości kinematycznej i dynamicznej (w GUM)

Wszystkie jednostki miar pozostałych wielkości są definiowane pośrednio przez te jednostki podstawowe i uzupełniające, np.

1 niuton to siła, która w kierunku jej działania nadaje masie 1 kg przyspieszenie 1 m/s^2

1 dżul to energia równa pracy wykonanej przez siłę 1 N w kierunku jej działania na drodze o długości 1 m

1 wat to moc, przy której praca 1 J wykonana jest w czasie 1 s

itd. dla kilkuset jednostek określonych w układzie SI.

Metoda podstawowa pomiaru dla układu SI polega na przedstawieniu każdej mierzonej wielkości w jednostce miary będącej iloczynem potęg podstawowych jednostek miar:

$$\text{m}^{\alpha} \text{kg}^{\beta} \text{s}^{\gamma} \text{A}^{\delta} \text{K}^{\varepsilon} \text{mol}^{\varphi} \text{cd}^{\psi}.$$