

Redefinicja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar SI

Międzynarodowy Układ Jednostek Miar, znany powszechnie jako SI, jest podstawowym układem jednostek miar stosowanym w świecie nauki, technologii, przemysłu i handlu. Ustanowiony na 11. posiedzeniu Generalnej Konferencji Miar (CGPM) w roku 1960 stopniowo ewoluował korzystając z najnowszych osiągnięć nauki i techniki. W trakcie kolejnych posiedzeń CGPM w miarę potrzeby dokonywano aktualizacji lub redefinicji jednostek podstawowych SI, jednakże w ostatnim czasie dokonano najbardziej spektakularnej ich nowelizacji. Te daleko idące zmiany ustanowiono Rezolucją nr 1 na 26. posiedzeniu CGPM w listopadzie 2018 roku. Ogromny postęp dokonany w ostatnich dekadach w fizyce atomowej i metrologii kwantowej umożliwił nowe podejście do wyrażania definicji jednostek w ogólności, a w szczególności do jednostek podstawowych SI. Aby prześledzić całą historię związaną z podjęciem tak ważkiej decyzji należałoby się cofnąć do 20. posiedzenia CGPM w 1995 roku. W jego trakcie zaprezentowano wyniki trzeciej weryfikacji państwowych wzorców kilograma w odniesieniu do międzynarodowego prototypu kilograma – IPK (International Prototype Kilogram). Rezultatem prezentacji uzyskanych wyników było sformułowanie zalecenia (w trakcie 21. posiedzenia CGPM) skierowanego do krajowych instytucji metrologicznych, w którym wskazywano konieczność podjęcia prac skoncentrowanych na ustanowieniu nowej definicji podstawowej jednostki miary masy opartej na stałych podstawowych lub stałych atomowych. Postanowienia podjęte w stosunku do definiowania kilograma zbiegły się w czasie z pracami prowadzonymi w latach 90. W dziedzinie metrologii elektrycznej były one związane z praktyczną realizacją jednostek elektrycznych przy wykorzystaniu kwantowego zjawiska Josephsona oraz kwantowego zjawiska Halla w odniesieniu do konwencjonalnej wartości stałej Josephsona i stałej von Klitzinga. W obliczu obu tych faktów stało się jasnym, jak

wiele korzyści może przynieść zdefiniowanie obu jednostek podstawowych SI, czyli kilograma i ampera, w oparciu o niezmiennie wartości liczbowe stałych podstawowych. Uchwałę w sprawie ewentualnej redefinicji Układu SI podjęto w trakcie 24. posiedzenia CGPM w roku 2011. Wtedy również wytyczono tzw. „mapę drogową” związaną z realizacją tego przedsięwzięcia. Efektem prowadzonych prac jest redefinicja Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, która zaczęła obowiązywać od dnia 20 maja 2019 roku.

Międzynarodowy Układ Jednostek Miar SI jest obecnie układem jednostek, w którym jako podstawę do ich zdefiniowania przyjęto wartości liczbowe następujących stałych:

- częstotliwości nadsubtelnego przejścia w atomie cezu 133 w niezaburzonym stanie podstawowym, $\Delta\nu_{Cs}$, równą 9 192 631 770 Hz,
- prędkości światła w próżni, c , równą 299 792 458 m/s,
- stałej Plancka, h , równą $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J s,
- ładunku elementarnego, e , równą $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C,
- stałej Boltzmann, k , równą $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ J/K,
- stałej Avogadra, N_A , równą $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol⁻¹,
- skuteczności świetlnej promieniowania monochromatycznego o częstotliwości 540×10^{12} Hz, K_{cd} , równą 683 lm/W,

gdzie herc, dżul, kulomb, lumen i wat o symbolach Hz, J, C, lm i W odniesione są do jednostek sekunda, metr, kilogram, amper, kelwin, mol i kandela, o symbolach s, m, kg, A, K, mol i cd, zgodnie z równościami $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$, $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$, $\text{C} = \text{A s}$, $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ oraz $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$.



Aktualnie obowiązujący zbiór siedmiu stałych definiujących wybrano w taki sposób, że każda z jednostek podstawowych SI może być zapisana za pomocą stałej definiującej lub za pomocą iloczynu czy ilorazu stałych. Sam zbiór został tak skonstruowany, aby zapewnić stabilne i uniwersalne odniesienie. Wartości liczbowe ustanowione dla stałej Plancka, ładunku elektrycznego, stałej Boltzmann oraz stałej Avogadra zostały zarekomendowane przez Komitet ds. Danych w Nauce i Technice w korekcie CODATA opublikowanej w dniu 1 lipca 2017 roku. W przypadku dwóch spośród wymienionych stałych definiujących ustalenie ich wartości liczbowej wiązało się z przeprowadzeniem długoletnich eksperymentów na skalę międzynarodową. Wartość liczbową stałej Plancka, przyjętą jako odniesienie w nowej definicji SI, uzyskano w trakcie eksperymentów z wykorzystaniem wagi Kibble’a prowadzonych w NIST i w innych renomowanych krajowych instytucjach metrologicznych. Natomiast wartość liczbową stałej Avogadra udało się uzyskać w trakcie realizacji wieloletniego projektu International Avogadro Coordination. Na tyle na ile pozwala na to stan dzisiejszej wiedzy i nauki, ustanowione wartości liczbowe stałych definiujących umożliwiają zachowanie zgodności z wcześniejszymi definicjami jednostek podstawowych, albowiem zasadniczą cechą wprowadzania wszelkich zmian w Międzynarodowym Układzie Jednostek Miar jest utrzymanie jego ciągłości. Równocześnie należy zwrócić uwagę na fakt, że wartościom liczbowym siedmiu stałych definiujących nie przypisano niepewności.

Jeśli przyjrzeć się istocie wybranych stałych definiujących, to jest ona bardzo zróżnicowana, bowiem zaliczają się do nich stałe podstawowe występujące w przyrodzie, jak również wybrane stałe techniczne.

Prędkość światła w próżni c oraz stała Plancka h należą do stałych podstawowych. Określają one, odpowiednio, właściwości czasoprzestrzenne i zjawiska kwantowe. Obie te stałe jednakowo oddziałują na wszystkie cząstki i pola, w każdej skali i w każdym otoczeniu.

Ladunek elementarny e jest powiązany z siłą sprzęgania pola elektromagnetycznego poprzez stałą struktury subtelnej $\alpha = e^2/(2c\epsilon_0 h)$, gdzie ϵ_0 to przenikalność elektryczna próżni (czyli stała elektryczna). Niektóre teorie przewidują zmienność α w czasie, ale doświadczalnie wyznaczone granice największej możliwej zmienności α są tak niskie, że jakkolwiek ich wpływ na przewidywalne pomiary praktyczne może zostać wykluczony.

Stała Boltzmanna k jest stałą proporcjonalności pomiędzy temperaturą (wyrażoną w jednostce kelwin) a energią (wyrażoną w jednostce dżul). Wartość liczbowa tej stałej ustalono na podstawie opisów skali temperatury. Temperatura układu odwzorowuje energię cieplną, ale już niekoniecznie energię wewnętrzną układu. W fizyce statystycznej stała Boltzmanna wiąże entropię (S) z liczbą dostępnych stanów kwantowo-mechanicznych (Ω) następującym równaniem: $S = k \ln \Omega$.

Stała Avogadra N_A , podobnie do stałej Boltzmanna k , ma również charakter stałej proporcjonalności. Jest ona stałą proporcjonalności pomiędzy ilością substancji (której jednostką jest mol) a ilością zliczonych obiektów (wyrażonej w jednostce wielkości o wymiarze jeden i o symbolu 1).

Skuteczność świetlna monochromatycznego promieniowania o częstotliwości 540×10^{12} Hz, K_{cd} , jest stałą techniczną. Wyraża ona dokładną zależność liczbowa pomiędzy czysto fizycznymi charakterystykami mocy promieniowania stymulującym oko ludzkie (W), a jego fotobiologiczną odpowiedzią zdefiniowaną przez strumień świetlny odpowiednio do czułości widmowej wzorcowego obserwatora (lm) przy częstotliwości 540×10^{12} herców.

Częstotliwość cezowa, $\Delta\nu_{Cs}$, ma charakter parametru atomowego związanego z częstotliwością nadsubtelnego przejścia w atomie cezu 133 w niezaburzonym stanie podstawowym. Parametr ten może ulegać oddziaływaniom otoczenia, takim jak np. oddziaływania pól magnetycznych. Jednakże stanowiące jej źródło przejście nadsubtelne jest dobrze zbadane i stabilne, stanowi więc właściwy wybór jako przejście odniesienia w rozważaniach praktycznych. Wybór parametru atomowego, jakim jest $\Delta\nu_{Cs}$, nie oddziela definicji od realizacji w taki sposób, jak h , c , e albo k , ale określa odniesienie.

Przed przyjęciem w roku 2018 nowych definicji jednostek podstawowych, Układ SI był definiowany za pomocą siedmiu jednostek podstawowych, z których tworzono jednostki pochodne jako iloczyny potęg jednostek podstawowych. Nowe podejście do definiowania SI, poprzez ustalenie liczbowych wartości siedmiu stałych definiujących, powoduje, że takie rozróżnienie nie jest w istocie potrzebne, gdyż wszystkie jednostki tak podstawowe, jak i pochodne mogą być zbudowane ze stałych definiujących. Jednakże po redefinicji Układu SI pojęcia jednostek podstawowych i pochodnych zostały utrzymane ze względu na fakt, że są one użyteczne i dobrze ugruntowane.

Warto także przypomnieć w tym miejscu, że seria norm ISO/IEC 80000 wyróżnia wielkości podstawowe i pochodne, którym powinny odpowiadać jednostki podstawowe i pochodne.

Obecne definicje jednostek podstawowych SI wraz z ich pełnym objaśnieniem BIPM opublikował w 9. wydaniu Broszury SI. Poniżej podano ich brzmienie w tłumaczeniu na język polski.

Sekunda, symbol s, jest to jednostka SI czasu. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej częstotliwości cezowej $\Delta\nu_{Cs}$, to jest częstotliwości nadsubtelnego przejścia w atomie cezu 133 w niezaburzonym stanie podstawowym, wynoszącej 9 192 631 770, wyrażonej w jednostce Hz, która jest równa s^{-1} .

Metr, symbol m, jest to jednostka SI długości. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej prędkości światła w próżni c , wynoszącej 299 792 458, wyrażonej w jednostce $m s^{-1}$, przy czym sekunda zdefiniowana jest za pomocą częstotliwości cezowej $\Delta\nu_{Cs}$.

Kilogram, symbol kg, jest to jednostka SI masy. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej stałej Plancka h , wynoszącej $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$, wyrażonej w jednostce J s, która jest równa $kg m^2 s^{-1}$, przy czym metr i sekunda zdefiniowane są za pomocą c i $\Delta\nu_{Cs}$.

Ampier, symbol A, jest to jednostka SI prądu elektrycznego. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej ładunku elementarnego e , wynoszącej $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$, wyrażonej w jednostce C, która jest równa A s, przy czym sekunda zdefiniowana jest za pomocą $\Delta\nu_{Cs}$.

Kelwin, symbol K, jest to jednostka SI temperatury termodynamicznej. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej stałej Boltzmanna k , wynoszącej $1,380\ 649 \times 10^{-23}$, wyrażonej w jednostce $J K^{-1}$, która jest równa $kg m^2 s^{-2} K^{-1}$, przy czym kilogram, metr i sekunda zdefiniowane są za pomocą h , c i $\Delta\nu_{Cs}$.

Mol, symbol mol, jest to jednostka SI ilości substancji. Jeden mol zawiera dokładnie $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ obiektów elementarnych. Liczba ta jest ustaloną wartością liczbową stałej Avogadra N_A wyrażonej w jednostce mol^{-1} i zwana jest liczbą Avogadra.

Ilość substancji, symbol n , układu jest miarą liczby obiektów elementarnych danego rodzaju. Obiektem elementarnym może być atom, cząsteczka, jon, elektron, każda inna cząstka lub danego rodzaju grupa cząstek.

Kandela, symbol cd, jest to jednostka SI światłości w określonym kierunku. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej skuteczności świetlnej monochromatycznego promieniowania o częstotliwości 540×10^{12} Hz, K_{cd} , wynoszącej 683, wyrażonej w jednostce $lm W^{-1}$, która jest równa $cd sr W^{-1}$ lub $cd sr kg^{-1} m^{-2} s^3$, przy czym kilogram, metr i sekunda są zdefiniowane za pomocą h , c i $\Delta\nu_{Cs}$.



Tablica poniżej zawiera nazwy, symbole oraz równania definiujące jednostki podstawowe SI.

wielkość	jednostka podstawowa SI		równanie definiujące jednostkę podstawową SI
	nazwa	symbol	
czas	sekunda	s	$1 \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$
długość	metr	m	$1 \text{ m} = \left(\frac{c}{299\,792\,458}\right) \text{ s}$
masa	kilogram	kg	$1 \text{ kg} = \left(\frac{h}{6,626\,070\,15 \times 10^{-34}}\right) \text{ m}^{-2}$
prąd elektryczny	amper	A	$1 \text{ A} = \left(\frac{e}{1,602\,176\,634 \times 10^{-19}}\right) \text{ s}^{-1}$
temperatura termodynamiczna	kelwin	K	$1 \text{ K} = \left(\frac{1,380\,694 \times 10^{-23}}{k}\right) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$
ilość substancji	mol	mol	$1 \text{ mol} = \left(\frac{6,022\,140\,76 \times 10^{23}}{N_A}\right)$
światłość	kandela	cd	$1 \text{ cd} = \left(\frac{K_{\text{cd}}}{683}\right) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1}$

Podane w ostatniej kolumnie tablicy równania definiujące jednostki podstawowe SI, zgodnie z decyzją CGPM, stanowią najwyższy poziom odniesienia w zakresie spójności wyniku pomiaru z SI. Po raz pierwszy dostępny jest pełny zestaw definicji, który nie odwołuje się do żadnych wzorców w postaci artefaktów (np. do masy międzynarodowego prototypu kilograma), właściwości materiałów (np. punktu potrójnego wody), czy opisów pomiarów (np. wyidealizowanych eksperymentów jak to było w przypadku ampera lub kandel).

Obecnie siedem stałych definiujących jest najbardziej fundamentalną cechą definicji całego Układu SI. Zastosowanie stałych do zdefiniowania jednostek miar powoduje oddzielenie definicji jednostek od ich realizacji i jednocześnie umożliwia ich praktyczne realizacje z najmniejszymi możliwymi niepewnościami. Te zmiany otwierają perspektywy dla praktycznych realizacji wszystkich jednostek miar z dokładnością, która jest ograniczona tylko przez kwantową naturę przyrody i nasze możliwości techniczne, a nie przez same definicje. Takie podejście daje możliwości poszukiwania zupełnie nowych i doskonalszych metod praktycznych realizacji jednostek miar bez potrzeby zmiany ich definicji. W ten sposób stworzono szansę dla innowacji, dzięki którym realizacja jednostki miary możliwa jest wszędzie z dokładnością rosnącą w miarę postępu techniki. Każde prawidłowe równanie fizyki określające zależność między stałymi definiującymi, a jednostką miary może być wykorzystane do praktycznej realizacji jednostki miary. Zatem redefinicja Układu

SI stanowi znaczący krok milowy. Szczegóły opisu metod eksperymentalnych mogących służyć do praktycznej realizacji definicji jednostek SI wypracowały poszczególne Komitety Doradcze (CCs) Międzynarodowego Komitetu Miar (CIPM). Opisy tych realizacji są określane mianem *mise en pratique*. W ogólności pojęcie „praktycznej realizacji jednostki” jest interpretowane w znaczeniu ustanowienia wartości wielkości i towarzyszącej jej niepewności w jednostkach miar zgodnych z jej definicją. Metody doświadczalne najwyższego rzędu stosowane do praktycznej realizacji jednostek miar, w których zastosowano równania fizyczne, odnoszące się bezpośrednio do definicji jednostki lub do konkretnej stałej definiującej, nazywane są metodami pierwotnymi. Zasadniczą właściwością metody pierwotnej jest to, że pozwala ona, aby wielkość była mierzona w pewnej wybranej jednostce przy wykorzystaniu pomiarów tylko takich wielkości, w których nie stosuje się tej jednostki.

Zgodnie z zaleceniami Komitetu Doradczego CIPM ds. Czasu i Częstotliwości (CCTF) istnieją dwa sposoby praktycznej realizacji sekundy, a są to:

- 1) pierwotne wzorce częstotliwości, czyli specjalnie zaprojektowane i zbudowane przez laboratoria metrologiczne (zegary atomowe) wzorce częstotliwości wytwarzające oscylacje elektryczne o częstotliwości będącej w ścisłej relacji z częstotliwością przejścia w atomie izotopu cezu 133. Dla takich pierwotnych wzorców częstotliwości oblicza się i koryguje odchylenia spowodowane relatywistycznym efektem Dopplera związanym z ruchem atomów, promieniowaniem termicznym otoczenia (przesunięciem wywołanym promieniowaniem ciała doskonale czarnego) oraz wieloma innymi czynnikami;
- 2) wtórne reprezentacje sekundy, dla których lista zalecanych wartości częstotliwości (14 różnych częstotliwości optycznych) oraz odpowiadających im niepewności standardowych charakteryzujących mikrofalowe przejścia w rubidzie jest prowadzona i publikowana od 2006 roku na stronie internetowej BIPM.

Komitety Doradcze CIPM ds. Długości (CCL) jako metody praktycznej realizacji metra zaleca:

- 1) pierwotne metody praktycznej realizacji definicji, które dzielą się na dwie grupy:
 - a) metody oparte na bezpośrednich pomiarach czasu potrzebnego na przebycie pewnej drogi przez światło,
 - a) metody pośrednie oparte na pomiarze czasu potrzebnego na przebycie pewnej drogi przez światło (interferometria optyczna);
- 2) wtórne metody realizacji dla potrzeb nanometrologii, w których można wyróżnić:
 - a) interferometrię rentgenowską (X-ray),
 - b) kalibrację powiększenia transmisyjnej mikroskopii elektronowej (TEM),
 - c) wzorce pomiarowe oparte na sieci krystalicznej krzemu.

Komitety Doradcze CIPM ds. Masy i Wielkości Powiązanych (CCM) rekomenduje obecnie dwie pierwotne metody, którymi można w praktyce zrealizować kilogram zgodnie z jego nową definicją:

- 1) realizację kilograma poprzez matematyczne równoważenie mocy elektrycznej mocą mechaniczną w układzie wagi Kibble'a;
- 2) realizację kilograma metodą interferometrii rentgenowskiej XRCD (X-ray-crystal-density).

Komitet Doradczy CIPM ds. Elektryczności i Magnetyzmu (CCEM) opisał trzy różne praktyczne realizacje ampera:

- 1) poprzez wykorzystanie prawa Ohma, z zależności jednostek $A = V/\Omega$ oraz wykorzystanie praktycznych realizacji jednostek pochodnych SI – wolta i oma, opartych odpowiednio na efektach kwantowych Josephsona i Halla;
- 2) poprzez wykorzystanie pojedynczego transportu elektronów (np. SET) i zależności jednostek $A = C/s$, wartości stałej e , opisanej równaniem $R_K = h/e^2$ oraz praktycznej realizacji sekundy. Należy jednak zauważyć, że w obecnej chwili realizacje oparte na metodzie transportu pojedynczych elektronów (SET) wciąż posiadają pewne ograniczenia techniczne i często charakteryzuje je większa niepewność względną, niż pozostałe realizacje. Prace badawcze związane z obniżeniem tej niepewności są w toku;
- 3) poprzez zastosowanie zależności $I = C dU/dt$, zależności jednostek $A = F V/s$ i praktycznej realizacji jednostek pochodnych SI – wolta i farada oraz praktycznej realizacji jednostki podstawowej SI – sekundy.

Najdokładniejszą praktyczną realizacją dla mola, zgodnie ze stanowiskiem reprezentowanym przez Komitet Doradczy CIPM ds. Ilości Substancji: Metrologia w Chemii i Biologii (CCQM) jest ta, która prowadzi do wyznaczenia stałej Avogadra. Wymaga ona, podobnie jak to opisano w przypadku realizacji kilograma, wyznaczenia liczby atomów (N) izotopu ^{28}Si w pojedynczym monokryształe krzemu z wykorzystaniem metody interferometrii rentgenowskiej XRCD oraz metody wolumetrycznej. Jednakże w praktyce CCQM rekomenduje także trzy poniżej opisane praktyczne realizacje podstawowej jednostki ilości substancji:

- 1) metodę grawimetryczną (dla substancji o wysokim stopniu czystości), gdy liczba obiektów N substancji X lub ilość tej substancji n w próbce może zostać zmierzona poprzez wyznaczenie iloczynu ułamka masowego tej substancji, $w(X)$, i masy m próbki z wykorzystaniem odpowiedniego równania;
- 2) wykorzystanie prawa gazu doskonałego, gdy ilość substancji n próbki czystego gazu może zostać wyznaczona poprzez rozwiązanie równania stanu dla tego gazu;
- 3) metodę elektrolityczną, która jest oparta na pomiarze ładunku elektrycznego koniecznego do przeprowadzenia całkowitej reakcji elektrolizy w roztworze substancji o wysokiej klasie czystości, którą w sposób ilościowy opisują prawa Faradaya.

Krajowe instytucje metrologiczne na świecie stosują wiele różnych metod do praktycznej realizacji jednostki podstawowej temperatury termodynamicznej: termometrię DGCT, akustyczną gazową termometrię (AGT), termometrię szumową lub termometrię dopplerowską (DBT). Jednakże zgodnie z zaleceniami Komitetu Doradczego CIPM ds. Termometrii (CCT) Międzynarodowa Skala Temperatur z roku 1990 (ITS-90), obowiązująca dla temperatur od 0,65 K, oraz Tymczasowa Skala Niskich Temperatur (PLTS-2000) pozostaną nadal w użyciu, umożliwiając precyzyjne, powtarzalne i praktyczne aproksymacje temperatury termodynamicznej.

Z podobną sytuacją mamy do czynienia w przypadku praktycznej realizacji podstawowej jednostki SI światłości. Spójność pomiarowa z kandelą nadal będzie realizowana zgodnie z wcześniej

rekomendowanymi przez Komitet Doradczy CIPM ds. Fotometrii i Radiometrii (CCPR) metodami radiometrycznymi.

Lista praktycznych realizacji jednostek SI dostępna na stronie internetowej BIPM będzie regularnie aktualizowana i nowelizowana, jeśli tylko zostaną opracowane nowe i lepsze metody eksperymentalne. Na całym świecie krajowe instytucje metrologiczne ustanawiają praktyczne realizacje definicji jednostek miar, aby umożliwić utrzymywanie spójności wyników pomiarów z SI. Głównym zadaniem Komitetów Doradczych CIPM jest zagwarantowanie ram organizacyjnych dla ustanowienia równoważności tych praktycznych realizacji w celu zapewniania ogólnoświatowej harmonizacji w zakresie spójności pomiarowej.