



Główny
Urząd
Miar

dokładnie
100 lat
1919-2019

REDEFINICJA SI

W ROLACH GŁÓWNYCH:
STAŁE PODSTAWOWE

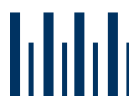




REDEFINICJA SI

**W ROLACH GŁÓWNYCH:
STAŁE PODSTAWOWE**

Warszawa 2018



gum.gov.pl



ul. Elektoralna 2
00-139 Warszawa
Godziny pracy: 8:00-16:00

tel. 22 581 93 99 (centrala)
fax: 22 581 93 92
e-mail: gum@gum.gov.pl

Koncepcja i skład: Biuro Strategii GUM.

W materiale wykorzystano materiał graficzny dotyczący SI udostępniony m.in. przez Międzynarodowe Biuro Miar (BIPM).

Główny Urząd Miar (GUM) jest krajową instytucją metrologiczną. Działa na rzecz zagwarantowania zdolności pomiarowych niezbędnych dla zrównoważonego rozwoju gospodarki oraz zapewnienia odpowiedniego poziomu jakości życia społeczeństwa oraz zabezpieczenia interesów obywateli.

Zadania GUM obejmują szerokie spektrum zagadnień związanych z metrologią, jednostkami miar i ich definicjami, jak również zaawansowanymi technologicznie wzorcami pomiarowymi oraz z tematyką ochrony bezpieczeństwa gospodarczego i technicznego państwa.

Redefinicja SI



Główne wyzwania współczesnego świata, przed którymi stajemy dzisiaj, są mierzalne. Mierzymy świat w sekundach, metrach, kilogramach czy amperach. W przytłaczającej większości krajów stosujemy do tego Międzynarodowy Układ Jednostek Miar SI, który scala niemal cały świat w spójną metrologiczną całość.

Spójna, jednolita metrologia dba o nasze zdrowie, środowisko, wymianę handlową, naukę, technikę i bezpieczeństwo. Przed współczesną metrologią pojawia się jednak nowe wyzwanie w postaci redefinicji SI, która sprawi, że metrologia gotowa będzie sprostać wymaganiom nowoczesności XXI wieku.

Dlaczego? W jakim celu? Co dzięki temu zyskamy?

Każdy, kto słyszy hasło „redefinicja SI” na pewno stawia sobie takie pytania. Aby zrozumieć, dlaczego jest to tak ważne i rewolucyjne, posłużymy się przykładowo jednostkami czasu i długości. W dziedzinach tych sytuacja jest niezwykle komfortowa i wiele innych dziedzin metrologicznych patrzyło przez lata zazdrosnym okiem na odtwarzanie jednostek miar tych właśnie wielkości. Metrologiczny komfort związany z tymi jednostkami jest możliwy dzięki wykorzystaniu do ich określenia stałych podstawowych. W dziedzinie czasu jednostka miary – sekunda – zdefiniowana jest jako ściśle określona liczba okresów promieniowania powstającego podczas zmiany stanu energetycznego atomu cezu (^{133}Cs), a w dziedzinie długości – metr – zdefiniowany jest za pomocą naturalnej własności naszego wszechświata – prędkości światła.

Metrologiczna jednolitość i spójność jednostek miar na całym świecie wymaga szeregu działań ze strony instytucji odpowiedzialnych na szczeblu krajowym za utrzymanie państwowych wzorców jednostek miar. Jednym z kluczowych działań w tej dziedzinie są międzynarodowe porównania wzorców, które w dużej ogólności służą sprawdzeniu jak dokładnie (i czy poprawnie) w danym kraju realizowana jest dana jednostka miary. W dziedzinach metrologii, opartych na stałych podstawowych, porównania te są znacznie ułatwione.

Dziedzina czasu i częstotliwości jest tu najlepszym przykładem prostoty wykonania takich porównań, gdyż wykorzystując wzorce pierwotne oparte na oscylacjach w atomie cezu oraz technologie zdalnych porównań (czy to poprzez łącza światłowodowe, czy satelity systemów nawigacji satelitarnej, czy też geostacyjne satelity telekomunikacyjne), w każdym momencie możemy porównać nasz wzorzec z innymi wzorcami z całego świata, po prostu wymieniając pliki z danymi i możemy to realizować praktycznie na bieżąco.

Sytuacja zupełnie przeciwna występuje w dziedzinie masy, w której to dziedzinie wzorzec kilograma jest ostatnim wzorcem materialnym (artefaktycznym). Swoisty „ostatni mohikanin” jest niewielkim walcem wykonanym z dużą dokładnością, jeśli chodzi o wymiary geometryczne, ze stopu platyny i irydu. Wzorzec międzynarodowy jednostki masy ukrywa się w piwnicach w Sèvres, szczelnie zamknięty przed wpływem czynników zewnętrznych. Takie same walce są w posiadaniu wszystkich krajów zrzeszonych konwencją metryczną i stanowią ich wzorce państwowe. Skąd więc możemy mieć pewność, że wykonany i wywzorcowany wzorzec masy przechowywany przez kilkadziesiąt lat, choć szczelnie zamknięty w jak najlepszych warunkach, waży wciąż kilogram?

Aby zagwarantować spójność pomiarową w tej dziedzinie, realizowane są międzynarodowe porównania wszystkich wzorców państwowych z wzorcem międzynarodowym. Można sobie wyobrazić, na jaką skalę jest to przedsięwzięcie, dość powiedzieć, że takie porównania wykonywane są średnio co kilkadziesiąt lat. Pomimo najstaranniejszej opieki roztaczanej nad cennymi walcami, obserwuje się zmiany ich masy spowodowane, czy to osadzaniem się na nich różnych cząsteczek obecnych w powietrzu, czy też erozji wywołanej również różnymi składnikami powietrza.

Rozwiązaniem opisanych (oczywiście tylko częściowo) problemów metrologicznych przy realizacji jednostek miar zgodnie z obecnymi definicjami jest wykorzystanie stałych podstawowych do ich zdefiniowania. Wielką zaletą w przyjęciu takiego podejścia jest założenie dzisiejszej nauki, iż podstawowe stałe fizyczne są w istocie stałe, a wzorce oparte na tych stałych mają szansę również pozostać niezmiennie.

REDEFINICJA

SI

„stare” a „nowe”

Gruntowna „rewolucja” objęła cztery jednostki miar: kilogram, amper, mol i kelwin, jednak zdecydowano o przebudowaniu tekstów wszystkich definicji, tak aby po redefinicji miały jednolitą budowę. Poniższe zestawienie zawiera obecnie obowiązujące definicje jednostek miar oraz ich nowe,

proponowane brzmienie. Nowe brzmienie definicji zostało ostatecznie sformułowane i zatwierdzone podczas XXVI Generalnej Konferencji Miar, która odbyła się w dniach 13 - 16 listopada 2018 roku. Nowe definicje jednostek miar zaczną obowiązywać od maja 2019 roku.



kg

masa → kilogram →

Obecna definicja

Jednostka masy, która jest równa masie międzynarodowego prototypu kilograma przechowywanego w Międzynarodowym Biurze Miar w Sèvres.

Nowa, proponowana definicja

Kilogram, oznaczenie kg, jest to jednostka masy w SI. 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 $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, przy czym metr i sekunda zdefiniowane są za pomocą c i $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Proponowana definicja, określa jednostkę $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ (jest to jednostka wielkości fizycznych działania i momentu pędu). W połączeniu z definicją metra (m) i sekundy (s) prowadzi to do określenia jednostki masy (kg), wyrażonej przy użyciu wartości stałej Plancka h .



długość → metr →

m

Obecna definicja

długość drogi przebytej w próżni przez światło
w czasie $1/299\,792\,458$ sekundy

Nowa, proponowana definicja

Metr, oznaczenie m, jest to jednostka długości w SI. 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 $\Delta\nu_{Cs}$.

Zgodnie z proponowaną definicją jeden metr jest długością drogi przebytej przez światło w próżni, w przedziale czasu równym $1/299\,792\,458$ sekundy.

czas → sekunda →

S

Obecna definicja

czas równy 9 192 631 770 okresom promieniowania odpowiadającego przejściu między dwoma nadsubtelnymi poziomami stanu podstawowego atomu cezu 133

Nowa, proponowana definicja

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

Zgodnie z proponowaną definicją, jedna sekunda jest równa czasowi trwania 9 192 631 770 okresów promieniowania odpowiadającego przejściu pomiędzy dwoma nadsubtelnymi poziomami niezaburzonego stanu podstawowego atomu cezu 133.





prąd elektryczny → amper →

A

Obecna definicja

prąd elektryczny niezmienny, który, płynąc w dwóch równoległych prostoliniowych, nieskończenie długich przewodach o przekroju kołowym znikomo małym, umieszczonych w próżni w odległości 1 metra od siebie, wywołałby między tymi przewodami siłę 2×10^{-7} niutona na każdy metr długości

Nowa, proponowana definicja

Amper, oznaczenie A, jest to jednostka prądu elektrycznego w SI. 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, gdzie sekunda zdefiniowana jest za pomocą $\Delta\nu_{Cs}$.

Zgodnie z proponowaną definicją jeden amper jest prądem elektrycznym odpowiadającym przepływowi $1/(1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19})$ ładunków elementarnych na sekundę.

temperatura
termodynamiczna → kelwin →

K

Obecna definicja

1/273,16 część temperatury termodynamicznej punktu potrójnego wody

Nowa, proponowana definicja

Kelwin, oznaczenie K, jest to jednostka temperatury termodynamicznej w SI. 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 $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$, gdzie kilogram, metr i sekunda zdefiniowane są za pomocą h , c i $\Delta\nu_{\text{Cs}}$

Zgodnie z proponowaną definicją jeden kelwin jest równy zmianie temperatury termodynamicznej, która skutkuje zmianą energii cieplnej kT o $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ J.



Obecna definicja

liczność materii układu zawierającego liczbę cząstek równą liczbie atomów w masie 0,012 kilograma węgla 12; przy stosowaniu mola należy określić rodzaj cząstek, którymi mogą być: atomy, cząsteczki, jony, elektrony, inne cząstki lub określone zespoły takich cząstek



liczność materii
→ mol →

mol

Nowa, proponowana definicja

Mol, oznaczenie mol, jest to jednostka ilości substancji w SI. Jeden mol zawiera dokładnie $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ obiektów elementarnych. Ta liczba jest ustaloną wartością liczbową stałej Avogadra N_A wyrażonej w jednostce mol^{-1} i jest nazywana 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 grupa cząstek danego rodzaju.

Zgodnie z proponowaną definicją jeden mol jest to ilość substancji układu zawierającego $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ obiektów elementarnych danego rodzaju.



Nowa, proponowana definicja

Kandela, oznaczenie cd, jest to jednostka światłości w określonym kierunku w SI. 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 $\text{cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$, gdzie kilogram, metr i sekunda są zdefiniowane za pomocą h , c i $\Delta\nu_{Cs}$.

Zgodnie z proponowaną definicją jedna kandela jest światłością, w danym kierunku, źródła emitującego promieniowanie o częstotliwości 540×10^{12} Hz przy natężeniu promieniowania w tym kierunku równym $(1/683)$ W/sr.

cd

światłość
← kandela ←

Obecna definicja

światłość źródła emitującego w określonym kierunku promieniowanie monochromatyczne o częstotliwości 540×10^{12} herców i o natężeniu promieniowania w tym kierunku równym $1/683$ wata na steradian




REDEFINICJA Co się zmieni?

S I

Jest to kolejne niezwykle ważne pytanie w kontekście nadchodzących zmian i zapewne pojawia się zaraz po pytaniu o celowość redefinicji.

Dla przytłaczającej większości ludzi nie zmieni się zupełnie nic. Telewizor nadal będzie działał tak samo, pobierając dokładnie taki sam prąd jak wcześniej, temperatura ciała zdrowego człowieka nadal będzie wynosiła 36,6 °C, a ważąc na wadze kuchennej mąkę potrzebną do upieczenia szarlotki, nadal zobaczymy te same gramy.



"Nowe" SI wśród uczniów i nauczycieli

Choć już z niektórymi obecnymi definicjami pojawiają się pewne problemy interpretacyjne (jak choćby definicja ampera o nieskończenie długich przewodnikach czy definicja sekundy wymagająca pewnego wprowadzenia w budowę atomów), to wszystkie nowe, proponowane definicje otrzymały brzmienie, opierające jednostki miary na stałych podstawowych.

Takie sformułowanie definicji jest przede wszystkim bardziej wymagające intelektualnie i bardziej abstrakcyjne. Wymaga szerszego wprowadzenia w fizykę i w zagadnienie stałych podstawowych. Wobec samych stałych podstawowych rodzą się pytania: skąd się wzięły i czym są, skąd wiemy, że mają dokładnie takie wartości liczbowe?

O ile metr oparty na prędkości światła jest w miarę dobrze rozumiany, gdyż prędkość jest wielkością fizyczną, z którą styka się każdy, jadąc choćby tramwajem do szkoły, o tyle już stała Plancka, często opisywana jako „kwant działania”, jest pojęciem niezwykle trudnym, wymagającym zgłębienia wiedzy o fizyce kwantowej.

Szkolne wyzwanie stawiane przez nowe definicje, jest na pewno obustronne. Wymaga większego zaangażowania intelektualnego i zgłębienia zagadnień

**UCZNIOWIE ORAZ
NAUCZYCIELE,
W SZCZEGÓLNOŚCI
NA NIŻSZYCH
POZIOMACH EDUKACJI,
SĄ GRUPĄ, KTÓRA
NAJPRAWDOPODOBNIJ
NAJBARDZIEJ ODCZUJE
KONSEKWENCJE
REWOLUCJI.**

dotyczących fizyki na nieco wyższym poziomie, zarówno od uczniów, jak i nauczycieli. Dodatkowo, nauczyciele obciążeni będą zadaniem odpowiedniego przekazania tej wiedzy uczniom. Transfer wiedzy zawsze był zagadnieniem trudnym, a po redefinicji na pewno jeszcze się skomplikuje.

W aspekcie redefinicji niezwykle ważką rolę mają do odegrania krajowe instytucje metrologiczne, których rolą, poza utrzymaniem wzorców państwowych, jest szerokie upowszechnianie wiedzy metrologicznej.

Na pewno pomocne będą przy tym materiały dydaktyczne przeznaczone dla różnych poziomów edukacyjnych, będące obecnie w przygotowaniu.



"Nowe" a nauka i technologia SI

Redefinicja SI jest olbrzymim krokiem naprzód w historii nauki i techniki. Definiując nowy układ SI, sięgamy daleko, nawet poza nasz układ słoneczny, po fizyczne stałe podstawowe, które są, w skali wszechświata, uniwersalne. Gdy rewolucja się dokona, wszystkie jednostki miary, i te podstawowe i te pochodne z nich wyprowadzone, będą oparte na filarach naszego świata – stałych podstawowych. Nauka i technologia nie będzie już dłużej ograniczana zmieniającymi się wzorcami materialnymi. Co więcej, postęp w nauce i technice, pozwalający wykonywać coraz lepsze przyrządy pomiarowe, pozwalający na odtwarzanie jednostek miar z coraz większą dokładnością, nie będzie skutkowało koniecznością wprowadzania kolejnych redefinicji.

**GDY REWOLUCJA SIĘ
DOKONA,
WSZYSTKIE JEDNOSTKI MIARY,
I TE PODSTAWOWE
I TE POCHODNE
Z NICH WYPROWADZONE,
BĘDĄ OPARTE NA FILARACH
NASZEGO ŚWIATA
– STAŁYCH PODSTAWOWYCH.**

**W CAŁYM
SKOMPLIKOWANIU
NOWYCH DEFINICJI, FIZYCE
KWANTOWEJ I STAŁYCH
PODSTAWOWYCH,
JEST JEDNA DOBRA
WIADOMOŚĆ. WPŁYW
"NOWEGO" SI NA ŻYCIE
PUBLICZNE BĘDZIE
ZNIKOMY.**

Zaraz po wejściu w życie redefinicji pójdziemy do marketu po kilogram mąki, zatankujemy 30 litrów paliwa na stacji benzynowej, a fryzjer skróci nam włosy o 5 centymetrów (choć akurat w tym ostatnim przypadku, jak zwykle będzie to za dużo)...

Przejdzie do nowego układu jednostek miar nie spowoduje przerwy w dostawie wody czy energii, nie zatrzyma kursowania transportu publicznego. Również wojsko będzie funkcjonowało nieprzerwanie, a pojazdy obrony narodowej będą poruszać się ciągle z taką samą prędkością i wystrzeliwać pociski na takie same odległości. Metrologia prawna będzie również działać w ten sam sposób, legalizacja wag, fotoradarów czy dystrybutorów paliwa na stacjach benzynowych będzie przebiegać zgodnie z wcześniejszymi procedurami. Dobra wiadomość jest również taka, że obecne jednostki miar będą stały na solidniejszych i bardziej uniwersalnych podstawach, a jeśli w kosmosie, poza kulą ziemską, istnieje życie, to będziemy mogli prowadzić z nimi bezproblemową wymianę handlową, opartą na nowej definicji kilograma.

"Nowe" SI
a życie
i publiczne

Ustalone wartości liczbowe siedmiu stałych podstawowych definiujących „nowe” SI

częstotliwość promieniowania przejścia kwantowego między dwoma nadsubtelnymi poziomami atomu cezu 133 w stanie podstawowym:

$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	$9\,192\,631\,770\text{ s}^{-1}$
-------------------------	----------------------------------

prędkość światła w próżni:

c	$299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$
-----	---------------------------------

stała Plancka:

h	$6,626\,070\,15 \times 10^{-34}\text{ J s (J s = kg m}^2\text{ s}^{-1}\text{)}$
-----	---

ładunek elementarny:

e	$1,602\,176\,634 \times 10^{-19}\text{ C (C = A s)}$
-----	--

stała Boltzmana:

k	$1,380\,649 \times 10^{-23}\text{ J K}^{-1}\text{ (J K}^{-1} = \text{kg m}^2\text{ s}^{-2}\text{ K}^{-1}\text{)}$
-----	---

stała Avogadra:

N_{A}	$6,022\,140\,76 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$
----------------	---

skuteczność świetlna źródła monochromatycznego promieniowania o częstotliwości $540 \times 10^{12}\text{ Hz}$:

K_{cd}	683 lm W^{-1}
-----------------	------------------------

Siedem jednostek podstawowych SI

czas → sekunda

1 s

$$9\,192\,631\,770/\Delta v_{Cs}$$

długość → metr

1 m

$$(c/299\,792\,458) s \approx 30,663\,319 c/\Delta v_{Cs}$$

masa → kilogram

1 kg

$$(h/6,626\,070\,15 \times 10^{-34}) s m^{-2} \approx 1,475\,521 \dots \times 10^{40} h \Delta v_{Cs} c^{-2}$$

prąd elektryczny → amper

1 A

$$(e/1,602\,176\,634 \times 10^{-19}) s^{-1} \approx 6,789\,687 \times 10^8 \Delta v_{Cs} e$$

temperatura termodynamiczna → kelwin

1 K

$$(1,380\,649 \times 10^{-23}/k) kg m^2 s^{-2} \approx 2,226\,665\,3 \Delta v_{Cs} h k^{-1}$$

ilość substancji → mol

1 mol

$$6,022\,140\,76 \times 10^{23} N_A^{-1}$$

światłość → kandela

1 cd

$$(K_{cd}/683) kg m^2 s^{-3} sr^{-1} \approx 2,614\,830 \times 10^{10} (\Delta v_{Cs})^2 h K_{cd}$$

Jednostki pochodne SI o nazwach i oznaczeniach specjalnych

Wielkość pochodna o specjalnej nazwie i oznaczeniu	Jednostka miary		Jednostka wyrażona w podstawowych jednostkach SI
	nazwa	oznaczenie	
kąt płaski	radian	rad	$\text{m m}^{-1} = 1$
kąt bryłowy	steradian	sr	$\text{m}^2 \text{m}^{-2} = 1$
częstotliwość	herc	Hz	s^{-1}
siła	niuton	N	kg m s^{-2}
ciśnienie, naprężenie	paskal	Pa	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$
energia, praca, ilość ciepła	dżul	J	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$
moc, strumień promieniowania	wat	W	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$
ładunek elektryczny	kulomb	C	A s
różnica potencjałów	wolt	V	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-3} \text{A}^{-1}$
pojemność elektryczna	farad	F	$\text{kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^4 \text{A}^2$
rezystancja	om	Ω	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-3} \text{A}^{-2}$
konduktancja	simens	S	$\text{kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3 \text{A}^2$
strumień magnetyczny	weber	Wb	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{A}^{-1}$
indukcja magnetyczna	tesla	T	$\text{kg s}^{-2} \text{A}^{-1}$
indukcyjność	henr	H	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{A}^{-2}$
temperatura Celsjusza	stopień Celsjusza	$^{\circ}\text{C}$	K
strumień świetlny	lumen	lm	cd sr
natężenie oświetlenia	luks	lx	cd sr m^{-2}
aktywność promieniotwórcza radionuklidu	bekerel	Bq	s^{-1}
dawka pochłonięta	grej	Gy	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
dawka równoważna	siwert	Sv	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
aktywność katalityczna	katal	kat	mol s^{-1}

