

Dlaczego zmieniają się definicje jednostek miar?

Why the definitions of measurement units are changed?

dr Paweł Fotowicz (Redaktor działu Technika i Pomiary)

Redefinicje podstawowych jednostek miar stają się koniecznością dziejową w metrologii. Definicje jednostek ewoluowały od odwoływania się do artefaktu, poprzez zjawiska fizyczne ku wartościom stałych fizycznych. To uwolni je od potrzeby dalszych zmian w sposobie ich definiowania oraz umożliwi nadanie im jednolitej formy zapisu.

Redefinitions of the base units of measurement become a historical necessity in metrology. Definitions evolved from referring to the artifact, through physical phenomena to the values of physical constants. Thus, the need for further changes of units definitions will no longer be necessary, and the units reach a unified form of wording.

W tym roku mija 225. rocznica przyjęcia pierwszej definicji metra, jako podstawowej jednostki miary długości w systemie metrycznym. System metryczny oparty jest na obiektywnych odniesieniach, wykorzystywanych do zdefiniowania jednostek miar. Gdy powstawał, w końcu XVIII wieku, był równie rewolucyjny jak miejsce i czas jego narodzin, w dobie Rewolucji Francuskiej. Rewolucja ta, niosąc nowe idee społeczne, pragnęła również przyczynić się do

stworzenia nowego rozwiązania w dziedzinie miar, odchodząc od ich antropometrycznego charakteru, opartego na wymiarach ludzkiego ciała, tak charakterystycznego dla dawniej stosowanych miar. Za podstawowe odniesienie uznano wymiary Ziemi, reprezentowane przez jej południk. W 1891 r. przyjęto pierwszą definicję metra w postaci jednej dziesięciomilionowej połowy południka, ze względów politycznych przechodzącego przez Paryż. Jednakże

Definicje metra

1. metr – jedna dziesięciomilionowa połowy południka przechodzącego przez Paryż, zawartego między równikiem i biegunem północnym – uchwała Francuskiego Zgromadzenia Narodowego **z 1791 r.**
2. metr – odległość w temperaturze 0 °C dwóch krańców ograniczających metr archiwalny – przechowywany we francuskim archiwum państwowym **od 1799 r.**
3. metr – odległość między osiami dwóch głównych kresiek naciętych na wzorcu, uznanym przez I Generalną Konferencję Miar za międzynarodowy prototyp metra, gdy wzorzec ten znajduje się w temperaturze 0 °C – uchwała I Generalnej Konferencji Miar **z 1889 r.**
4. metr – długość równa 1 650 763,73 długości fali w próżni promieniowania odpowiadającego przejściu między poziomami $2p_{10}$ a $5d_5$ atomu kryptonu 86 – uchwała XI Generalnej Konferencji Miar **z 1960 r.**
5. metr – długość drogi przebytej w próżni przez światło w czasie $1/299\,792\,458$ sekundy – uchwała XVII Generalnej Konferencji Miar **z 1983 r.**

praktyczne zrealizowanie tej definicji nie było łatwe, szczególnie w trudnych czasach rewolucyjnych. Zadania tego podjęli się dwaj francuscy uczeni Jean Baptiste Delambre i Pierre Francois Méchain. Delambre wykonywał pomiary metodą triangulacyjną na odcinku od Dunkierki do Rodez, a Méchain pomiędzy Barceloną a Rodez. W 1799 r. ostatecznie przyjęto, wyznaczoną na drodze pomiarów geodezyjnych, długość metra i na tej podstawie wykonano z platyny jego materialny wzorzec w postaci końcowej (odległość metra wyznaczały końcowe jego powierzchnie). Od tej pory wzorzec ten definiował samą jednostkę długości systemu metrycznego. Jednocześnie wykonano platynowy wzorzec kilograma, który miał być odpowiednikiem masy jednego litra wody. Oba artefakty zdeponowano w Archiwum Republiki Francuskiej [1].

Sposób definiowania podstawowych jednostek miar w oparciu o artefakty przyjęto również po podpisaniu Konwencji Metrycznej w 1875 r. Metr wyznaczała odległość pomiędzy środkowymi kresami wzorca kreskowego, wykonanego ze stopu platynowo-irydowego. Jednakże dokładność odtwarzania takiej jednostki nie była zbyt wysoka (niepewność względna $2 \cdot 10^{-7}$). Znacznie wyższą odtwarzalność jednostki długości zapewniało zjawisko interferencji fali optycznej, pochodzącej z monochromatycznego źródła promieniowania. Prace nad tym zjawiskiem i budową interferometru do jego realizacji prowadził Albert Abraham Michelson, noblista z Kujaw [2]. Ścisłe współpracując z Międzynarodowym Biurem Miar, już pod koniec XIX wieku zaproponował zdefiniowanie metra w oparciu o wielokrotność długości fali światła. Idea ta została zrealizowana dopiero w drugiej połowie XX wieku, gdy ostatecznie porzucano sposób definiowania długości w oparciu o artefakt na rzecz definicji opartej o zjawisko fizyczne. Dzięki temu można było odtwarzać jednostkę długości z niepewnością względną $2 \cdot 10^{-8}$, a nawet 10^{-9} [3]. Jednakże lata 60. XX wieku przyniosły nowe źródło promieniowania, jakim jest laser. Emisja wymuszona, uzyskiwana w obszarze rezonatora tego urządzenia, umożliwia wygenerowanie wyjątkowo wąskiej linii widmowej o szerokości spektralnej pozwalającej na odtwarzanie długości z niepewnością względną dochodzącą do 10^{-11} . Interferometry laserowe umożliwiały pomiar odległości z dokładnością lepszą od przyjętej definicji metra w oparciu o promieniowanie monochromatyczne. Musiało to doprowadzić do

kolejnej redefinicji jednostki długości i oparcia jej już nie na zjawisku fizycznym, lecz na stałej fizycznej. Wybór padł na prędkość światła, jako niezmienną wartość w próżni, opierając go na dokonaniach dwóch Albertów: Michelsona i Einsteina. Pierwszy odkrył bowiem, przy pomocy eksperymentu przeprowadzonego jeszcze w XIX w., że prędkość światła jest niezależna od szybkości jej źródła, a drugi sformułował podstawowy postulat szczególnej teorii względności, mówiący o stałości tej prędkości, niezależnej od kierunku i obserwatora. Dlatego przyjęta w 1983 r. definicja metra odwoływała się do umownie ustalonej jej wartości prawdziwej. Dzięki przyjęciu tej definicji możliwe jest wyznaczanie długości fali światła w oparciu o wzór:

$$\lambda \cdot f = c_0 \quad (1)$$

gdzie λ to długość światła, f – jego częstotliwość, a $c_0 = 299\,792\,458$ m/s to umownie przyjęta wartość prawdziwa prędkości światła w próżni. Możliwe jest też zwiększenie dokładności odtwarzania jednostki miary długości, poprzez pomiar częstotliwości i fakt, że sama stała fizyczna, którą uznano za prawdziwą, jest wartością dokładną i nie powiększa niepewności jej wyznaczenia. W ten sposób realizowana jest jednostka długości w układzie państwowego wzorca pomiarowego [4, 5]. Tak oto metr doczekał się w swojej historii aż pięciu kolejnych definicji [6].

Bardziej konserwatywne było podejście do drugiej podstawowej jednostki miary, jaką jest kilogram. Po Konwencji Metrycznej zdecydowano się na wykonanie artefaktów z materiału o większej gęstości niż platyna i wybór padł na stop platynowo-irydowy. Wykonano trzy wzorce, z których jeden, w wyniku porównania, uznano za zgodny z masą artefaktu archiwalnego. Wzorzec ten został uznany za definiujący jednostkę miary masy. Następnie wykonano partię kolejnych 40 wzorców, z tolerancją ± 1 mg [7]. Większość z nich rozdzielono pomiędzy kraje członkowskie Konwencji Metrycznej, a pozostałe przeznaczono na oficjalne kopie kilograma i zdeponowano w sejfie. Pierwsze poważniejsze porównania kopii oficjalnych z międzynarodowym artefaktem przeprowadzono po drugiej wojnie światowej. Ujawniły one zjawisko zmiany masy większości kopii w odniesieniu do wzorca definiującego kilogram. Był to trend wzrostowy, który dobitnie potwierdziły porównania przeprowadzone na przełomie lat 80. i 90. ubiegłego stulecia. Prawdopodobną przyczyną zmiany masy jest

Propozycje nowych definicji wybranych jednostek miar SI

metr – jednostka długości, której wartość ustalono poprzez przyjęcie dokładnej wartości liczbowej dla prędkości światła w próżni równej 299 792 458, wyrażonej w układzie jednostek SI jako m s^{-1}

kilogram – jednostka masy, której wartość ustalono poprzez przyjęcie dokładnej wartości liczbowej dla stałej Plancka, równej $6,626\ 06\text{X} \cdot 10^{-34}$, wyrażonej w układzie jednostek SI jako $\text{m}^2 \text{kg s}^{-1}$

amper – jednostka prądu elektrycznego, której wartość ustalono poprzez przyjęcie dokładnej wartości liczbowej dla ładunku elementarnego, równej $1,602\ 17\text{X} \cdot 10^{-19}$, wyrażonej w układzie jednostek SI jako s A

kelwin – jednostka temperatury termodynamicznej, której wartość ustalono poprzez przyjęcie dokładnej wartości liczbowej dla stałej Boltzmanna, równej $1,380\ 6\text{X} \cdot 10^{-23}$, wyrażonej w układzie jednostek SI jako $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$

mol – jednostka liczności materii określonej jednostki elementarnej, takiej jak atom, molekula, jon, elektron lub każda inna cząstka lub określona grupa takich cząstek, której wartość ustalono poprzez przyjęcie dokładnej wartości liczbowej dla stałej Avogadra, równej $6,022\ 14\text{X} \cdot 10^{23}$, wyrażonej w układzie jednostek SI jako mol^{-1}

Symbol X reprezentuje kolejne cyfry znaczące stałych fizycznych, jeszcze nie zatwierdzone przez CODATA.

zjawisko osadzania się węglowodorów na powierzchni artefaktów. Oszacowany dryf masy to $50 \mu\text{g}$ na sto lat [7]. Dodatkowym czynnikiem jest też zjawisko utraty masy przez artefakty po czynności czyszczenia i mycia wzorców przed pomiarami, w granicach od $8 \mu\text{g}$ do $16 \mu\text{g}$ [8], jak również zjawisko nieliniowej dynamiki jej przerostu już po wykonaniu tej czynności, w granicach od $10 \mu\text{g}$ na rok, w początkowym okresie, do $1 \mu\text{g}$ na rok, w długim terminie [9]. Powstał zatem problem jak w przyszłości radzić sobie z tym zjawiskiem. Uznano, że najlepszym rozwiązaniem będzie powiązanie jednostki masy, podobnie jak jednostki długości, też ze stałą fizyczną i wykorzystanie do jej odtwarzania zjawiska fizycznego. Wybór padł na wagę prądową, w której ciężar artefaktu równoważony jest siłą elektrodynamiczną. Jednakże nie opcja równoważenia sił okazała się dokładniejsza przy odtwarzaniu masy, lecz opcja dynamiczna działania tego urządzenia, polegająca na równoważeniu mocy wydzielanej w polu magnetycznym przez ruchomą cewkę prądową mocą wydzielaną w polu grawitacyjnym przez poruszającą się w nim masę. Równoważenie to określa poniższy wzór:

$$U \cdot I = m \cdot g \cdot v \quad (2)$$

gdzie U to napięcie, a I to natężenie prądu w obwodzie ruchomej cewki, m – masa, g – przyspieszenie ziemskie, a v – prędkość ruchu masy. Ze względu na to, że pomiary parametrów elektrycznych odnoszą się do wzorców wykorzystujących zjawisko Josephsona i kwantowy efekt Halla [10], stosowane są stałe Josephsona i von Klitzinga: K_J i R_K , powiązane ze stałą Plancka h zależnością:

$$h = \frac{4}{R_K \cdot K_J^2} \quad (3)$$

Masę można określić definicyjnie, bez odwoływania się do artefaktu [11]:

$$m = h \frac{K_J^2 \cdot R_J \cdot U \cdot I}{4 \cdot g \cdot v} \quad (4)$$

gdzie kluczowym parametrem jest stała Plancka. Od wyznaczenia jej wartości zależy poprawność zdefiniowania jednostki miary masy, tak jak od przyjętej wartości prędkości światła zależy poprawność definicji metra. Wymaga to również ustalenia wzajemnej zgodności pomiędzy ustalonymi wartościami wszystkich trzech stałych fizycznych: Plancka, Josephsona i von Klitzinga. Taką zgodność osiągnięto w 2014 r., gdy Komitet ds. Danych dla Nauki i Techniki

CODATA podał zaktualizowane wartości tych trzech podstawowych stałych fizycznych. Wynika z nich, że różnica pomiędzy wartością stałej Plancka, obliczoną na podstawie zależności (3) i jej wartością ustaloną na drodze eksperymentalnej, różni się tylko o jednostkę na dziewiątej pozycji dziesiętnej, co przekłada się na niedokładność definiowanej jednostki miary masy, w granicach dziesiątych części mikrograma. Jest to wartość stukrotnie mniejsza od niepewności wyznaczenia samej stałej Plancka. W ten sposób otwiera się droga ku skutecznej redefinicji kilograma w oparciu o stałą fizyczną, wraz z możliwością jej praktycznej realizacji [12].

Chcąc uniknąć w przyszłości konieczności ponownej redefinicji podstawowych jednostek miar, nowe definicje opierać się będą o stałe fizyczne. Dla każdej podstawowej jednostki odniesieniem będzie inna stała fizyczna. Przykładowo, dla metra – prędkość światła w próżni, dla kilograma – stała Plancka, dla ampera – elementarny ładunek elektryczny, dla kelwina – stała Boltzmana, a dla mola – stała Avogadra [13]. Składnia definicji będzie podobna, a różnica dotyczyć będzie przede wszystkim przyjętych wartości liczbowych, jako wartości umownie prawdziwych, dla każdej stałej fizycznej oddzielnie. Tak oto spełni się pragnienie twórców systemu metrycznego, by oprzeć definicje jednostek miar o niezmiennie i trwale odniesienia.

Literatura

- [1] Kowalczevska Z., *Historja systemu metrycznego (1791–1921)*, Przegląd Techniczny, tom LIX, nr 13 i 14, rok 1921, s. 85-89.

- [2] *Albert Abraham Michelson noblista z Kujaw*. Studia i materiały pod redakcją D. Kurzawy, Strzelno 2007.
- [3] Obalski J., *Zasady międzynarodowego układu jednostek miar SI*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1970.
- [4] Ramotowski Z., Walczuk J., *Państwowy wzorzec jednostki miary długości jako przykład praktycznej realizacji metra*, Biuletyn GUM nr 4(8), rok 2007, s. 3-8.
- [5] Czulek D., Szumski R., *Modernizacja państwowego wzorca jednostki długości poprzez zastosowanie syntezera częstotliwości*, Biuletyn GUM nr 3(18), rok 2010, s. 44-47.
- [6] Jakubiec W., Malinowski J., *Metrologia wielkości geometrycznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004.
- [7] Davis R., *The SI unit of mass*, Metrologia vol. 40, rok 2003, s. 299-305.
- [8] Stock M., Barat P., Davis R. S., Picard A., Milton M. J. T., *Calibration campaign against the international prototype of the kilogram in anticipation of the redefinition of the kilogram part I: comparison of the international prototype with its official copies*, Metrologia, vol. 52, rok 2015, s. 310-316.
- [9] Nielsen L., Davis R., Barat P., *Improving traceability to the international prototype of the kilogram*, Metrologia, vol. 52, rok 2015, s. 538-551.
- [10] Dudek E., Mosiądz M., Orzepowski M., *Wzorce wielkości elektrycznych oparte na zjawiskach kwantowych*, Biuletyn GUM nr 3(14), rok 2009, s. 3-16.
- [11] Taylor B. N., Mohr P. J., *On the redefinition of the kilogram*, Metrologia, vol. 36, rok 1999, s. 63-64.
- [12] Newell D., *A more fundamental International System of Units*, Physics Today, vol. 67, rok 2014, s. 35-41.
- [13] *Resolutions adopted by the General Conference on Weights and Measures (24th meeting)*, Paris, s. 17-21 October 2011.