

Dlaczego zmieniają się definicje jednostek miar?

dr inż. Paweł Fotowicz
Główny Urząd Miar

Redefinicje podstawowych jednostek miar stały się koniecznością dziejową w metrologii. Definicje jednostek ewoluowały od odwoływania się do artefaktu, poprzez zjawiska fizyczne ku wartościom stałych fizycznych. Dzięki temu osiągnęły spójną i jednolitą formę zapisu. To również uwalnia je od potrzeby dalszych zmian w sposobie ich definiowania oraz nie będą już ograniczały rozwoju nowych metod ich odtwarzania z coraz to większą dokładnością.

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 roku 1791 przyjęto pierwszą definicję metra w postaci jednej dziesięciomilionowej połowy południka, ze względów politycznych przechodzącego przez Paryż. Jednakże 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 roku 1799 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 roku. 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]. Ściśle 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 porzucono 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. dwudziestego 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 w próżni, jako wielkość niezmienną, opierając go na dokonaniach dwóch Albertów: Michelsona i Einsteina. Pierwszy odkrył bowiem, że prędkość światła jest niezależna od szybkości jej źródła, w eksperymencie przeprowadzonym jeszcze w XIX wieku, a drugi sformułował podstawowy postulat szczególnej teorii względności, mówiący o stałości tej prędkości, niezależnej od kierunku

i obserwatora. Dlatego przyjęta definicja metra w roku 1983 odwoływała się do umownie ustalonej jej wartości prawdziwej. Przy realizacji metra możliwe jest wykorzystanie zależności:

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

gdzie λ to długość fali światła, f – jego częstotliwość, a $c = 299\,792\,458$ m/s to umownie przyjęta wartość prawdziwa prędkości światła w próżni. Dzięki temu możliwe jest również 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.

Tak oto metr doczekał się w swojej historii aż pięciu kolejnych definicji.

Definicje metra

- 1791** metr – jedna dziesięciomilionowa połowy południka przechodzącego przez Paryż, zawartego między równikiem i biegunem północnym – uchwała Francuskiego Zgromadzenia Narodowego z 1791 r.
- 1799** metr – odległość w temperaturze $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ dwóch krańców ograniczających metr archiwalny – przechowywany we francuskim archiwum państwowym od 1799 r.
- 1889** metr – odległość między osiami dwóch głównych kresek naciętych na wzorcu, uznanym przez I Generalną Konferencję Miar za międzynarodowy prototyp metra, gdy wzorzec ten znajduje się w temperaturze $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – uchwała I Generalnej Konferencji Miar z 1889 r.
- 1960** 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.
- 1983** metr – długość drogi przebytej w próżni przez światło w czasie $1/299\,792\,458$ sekundy – uchwała XVII Generalnej Konferencji Miar z 1983 r.



Bardziej konserwatywne było podejście do drugiej podstawowej jednostki miary, jakim 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 [4]. Większość z nich rozdzielono pomiędzy kraje członkowskie Konwencji Metrycznej, a pozostałe przeznaczono na kopie oficjalne 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 zjawisko osadzania się węglowodorów na powierzchni artefaktów. Oszacowany dryf zmiany masy to 50 μg na sto lat [4]. Dodatkowym czynnikiem jest też zjawisko utraty masy przez artefakty po czynności czyszczenia i mycia wzorców przed pomiarami, w granicach od 8 μg do 16 μg [5], jak również zjawisko nieliniowej dynamiki jej przerostu już po wykonaniu tej czynności, w granicach od 10 μg na rok, w początkowym okresie, do 1 μg na rok, w długim terminie [6]. 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.

W urzędzeniu do wyznaczania masy, zwanym wagą Kibble'a, wykorzystuje się dwie opcje działania, statyczną i ruchową. W pierwszej mierzone jest natężenie przepływającego przez cewkę prądu elektrycznego, a w drugiej indukowane w niej napięcie. Oba te niezależne pomiary wyrażone w jednym równaniu, które można nazwać

wirtualnym równoważeniem mocy, prowadzą do zależności:

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

gdzie iloczyn napięcia U i natężenia prądu I cewki określa wirtualną moc elektryczną, a iloczyn masy m , przyspieszenia ziemskiego g i prędkości v ruchu masy wyznacza wirtualną moc mechaniczną. Moc ta jest wirtualna, gdyż wynika tylko z zapisu samego równania, które umożliwia wyznaczenie mierzonej masy. Dzięki bardzo dokładnemu pomiarowi napięcia, prądu, przyspieszenia ziemskiego i prędkości w zespołach wagi Kibble'a można wyznaczyć z dużą dokładnością samą masę. Takie postępowanie wymaga oczywiście zastosowania bardzo technicznie zaawansowanego stanowiska pomiarowego, wykorzystującego bardzo dokładne kwantowe wzorce elektryczne, interferometri laserowej, a pomiar wykonywany jest w warunkach wysokiej próżni. W ten sposób otworzyła się droga ku skutecznej redefinicji kilograma w oparciu o stałą fizyczną, wraz z możliwością jej praktycznej realizacji [7].

Aby uniknąć w przyszłości konieczności ponownej redefinicji podstawowych jednostek miar, nowe definicje opierają się na stałych podstawowych [8]. Dla każdej podstawowej jednostki odniesieniem jest inna stała: dla metra – prędkość światła w próżni, dla kilograma – stała Plancka, dla ampera – elementarny ładunek elektryczny, dla kelwina – stała Boltzmanna, a dla mola – stała Avogadra. Składnia definicji jest podobna, a różnice dotyczą przede wszystkim przyjętych wartości liczbowych, jako wartości umownie prawdziwych, dla każdej stałej podstawowej oddzielnie. Tak oto spełnia się pragnienie twórców systemu metrycznego, by oprócz definicji jednostek miar o niezmiennie i trwale odniesienia.

Biorąc pod uwagę burzliwą historię podstawowych jednostek miar można też powiedzieć, że kilogram po związaniu się ze stałą Plancka nie będzie się już musiał się wstydzić, że traci na wadze, a metr z prędkością światła uświadomi sobie, że nie będzie się już zmieniał.

Literatura

- [1] Z. Kowalczevska: Historia 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] J. Obalski: Zasady międzynarodowego układu jednostek miar SI. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1970.
- [4] R. Davis: The SI unit of mass. Metrologia vol. 40, rok 2003, s. 299-305.
- [5] M. Stock, P. Barat, R. Davis, A. Picard, M. Milton: 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.
- [6] L. Nielsen, R. Davis, P. Barat: Improving traceability to the international prototype of the kilogram. Metrologia, vol. 52, rok 2015, s. 538-551.
- [7] D. Newell: A more fundamental International System of Units. Physics Today, vol. 67, rok 2014, s. 35-41.
- [8] The International System of Units (SI). The ninth edition SI Brochure, 2019.

