

Historia kilograma

Autor : Paweł Fotowicz
Opublikowane przez : Adam Żeberkiewicz

Historia kilograma zaczyna się w dobie Rewolucji Francuskiej. Pierwotnie, dla podstawowej jednostki masy systemu metrycznego przewidywano nazwę graw, która odpowiadała masie litra wody. Nazwa jednostki wywodziła się od grawitacji, ciężenia. Niestety rewolucjonistom francuskim sama nazwa jednostki źle się kojarzyła, bo ze szlacheckim tytułem niemieckim *graf*. Rewolucjoniści, z przyczyn politycznych, uważali, że nowe jednostki miar mają wyrażać ideę równości społecznej. Dlatego w 1795 r. dla jednostki masy przyjęli nazwę gram, która była używana dla tysięcznej części grawa. Jednakże, ze względów praktycznych, w 1799 r. wykonano artefakt o masie tysiąca gramów, jako pierwotny wzorzec masy i dodano przedrostek kilo (tysiąc), powołując do życia kilogram. Wzorzec ten wykonano z platyny w postaci walca o średnicy i wysokości ok. 39 mm.

Wzorzec kilograma, pamiętający czasy Rewolucji Francuskiej, nazywany Kilogramme des Archives, przetrwał do czasów Konwencji Metrycznej, podpisanej 20 maja 1875 r. w Paryżu. Wówczas postanowiono wykonać nowe wzorce kilograma z platynoirydu, w którym iryd stanowił 10 % masy prototypu kilograma. Stop platynowo-irydowy specjalnie zastosowano dla wzorców Konwencji Metrycznej, ponieważ charakteryzował się odpornością na korozję, wysoką gęstością, dobrym przewodnictwem elektrycznym i cieplnym oraz niską podatnością magnetyczną.

W 1880 r. wykonano pierwsze trzy prototypy ze stopu dostarczonego przez brytyjską firmę Johnson-Matthey. Forma nowych wzorców była taka sama jak wzorca francuskiego z czasów Rewolucji Francuskiej, czyli walca o średnicy i wysokości ok. 39 mm. Artefakty te były określane jako KI, KII i KIII. Pierwszym krokiem było porównanie ich z platynowym wzorem francuskim (Kilogramme des Archives), który otrzymał symbol A. Ponieważ jego gęstość była mniejsza, ze względu na większą gęstość irydu od platyny, niż w przypadku nowych wzorców kilograma, przy porównaniu artefaktów została zastosowana odpowiednia korekta wyporności. Po uwzględnieniu korekty związanej z wyporem powietrza stwierdzono, że masy wzorców KIII i A są takie same. Z tego powodu KIII wybrano jako międzynarodowy prototyp kilograma, a Międzynarodowy Komitet Miar formalnie przyjął decyzję o uznaniu tego wzorca w 1883 r.

Oficjalnie międzynarodowy prototyp kilograma, nazywany Le Grand K lub International Prototype of Kilogram (IPK), był usankcjonowany w 1889 r. na mocy rezolucji pierwszej Generalnej Konferencji Miar i do dziś jest przechowywany w Międzynarodowym Biurze Miar (BIPM), w szafie panczernej pod trzema szklanymi kloszami, z których największy ma zawór na górze w celu odpompowywania powietrza. Klucze do szafy są w gestii dyrektora Międzynarodowego Biura Miar, przewodniczącego Międzynarodowego Komitetu Miar (CIPM) oraz w posiadaniu Archives de France.

Po wykonaniu międzynarodowego prototypu zostało złożone drugie zamówienie w firmie Johnson-Matthey w celu wyprodukowania kolejnych 40 cylindrów, które miały się stać krajowymi wzorcami i dodatkowymi kopiami kilograma. Gęstość każdego prototypu określono przez ważenie hydrostatyczne, a każdy artefakt doprowadzono do masy kilograma z tolerancją ± 1 mg, w odniesieniu do międzynarodowego prototypu. Ścisłejsza tolerancja wykonania została uznana za niepraktyczną. Prototypy zostały ponumerowane, a każdy z numerów był wygrawerowany na ich powierzchni. Trzydzieści wzorców, wybranych na drodze losowania, zostało przekazanych krajom Konwencji Metrycznej.

Dodatkowe kopie kilograma, a jest ich sześć, mające status kopii oficjalnych, są przechowywane w tym samym miejscu, co prototyp międzynarodowy, tylko znajdują się pod dwoma kloszami. Wraz z upływem czasu powstawała kwestia, czy wszystkie prototypy kilograma utrzymują swoją wzorcową masę. Odpowiedź na to pytanie mogły dać tylko porównania wzajemne ich mas.

Historycznym krokiem na tej drodze była pierwsza weryfikacja prototypów krajowych. Dziesięć lat po ich rozdysponowaniu pomiędzy kraje członkowskie Konwencji Metrycznej, państwa te zostały zaproszone do odesłania swoich wzorców kilograma z powrotem do BIPM w celu sprawdzenia ich stabilności. Pomiar przeprowadzono w różnych okresach od 1899 do 1911 roku, z udziałem 25 prototypów.

Pierwsze prawdziwe porównania międzynarodowego prototypu i jego sześciu oficjalnych kopii zostały zapoczątkowane w 1939 r. Pojawia się wówczas hipoteza o możliwości utraty masy, rzędu kilkunastu mikrogramów, przez międzynarodowy wzorec kilograma. Chociaż badanie to zostało przerwane przez wojnę, było już wtedy jasne, że metoda czyszczenia prototypów i jej powtarzalności będzie kluczowa dla oceny wyników porównań. Dlatego prace w latach wojennych zaowocowały opracowaniem metody czyszczenia i mycia wzorców w BIPM. Zaproszenie do udziału w postępowaniu zostało wydane w 1947 r., a pomiary zakończono w 1954 r. W tym okresie zostały wykonane również dodatkowe krajowe prototypy dla nowych członków Konwencji Metrycznej, uwzględnione w badaniach (jeden z takich prototypów o kolejnym numerze 51 otrzymała Polska). W wyniku przeprowadzonego porównania stwierdzono, że cztery z oficjalnych kopii kilograma od 1889 r. zyskały ponad

0,03 mg, bez wyraźnego powodu.

Prace nad kolejnymi porównaniami i trzecią weryfikacją, rozpoczęto w 1988 r., a zakończono je w 1992 r. Weryfikacja ta była w dużej mierze motywowana znaczącym upływem czasu (sto lat od ustanowienia wzorca kilograma), jak również pojawieniem się nowej generacji komparatorów masy. Po raz pierwszy został zmierzony sam wpływ czyszczenia na wszystkie prototypy. Dostępność precyzyjnego komparatora masy umożliwiła też przeprowadzenie wstępnych badań dotyczących skutków tej czynności. Ustalono, że istotną kwestią jest sam proces przygotowania do porównań prototypów, jako efekt stosowania powtarzanych procedur czyszczenia i mycia. Badania wykazały, że utrata masy z powodu kolejnego mycia staje się nieistotna po co najwyżej dwóch takich operacjach. Właśnie na podstawie tych badań, CIPM zdecydował, że definicja kilograma powinna być interpretowana jako odnosząca się do masy międzynarodowego prototypu po oczyszczeniu i myciu z zastosowaniem procedury BIPM.

Masa sześciu oficjalnych wzorców kilograma wzrosła w odniesieniu do IPK, od pierwszego wzorcowania, średnio o około 0,05 mg, przez 100 lat. Trzecia weryfikacja wykazała też, że masa 22 spośród 27 innych badanych artefaktów również wzrosła od ich początkowego wzorcowania. Nieuchronnym wnioskiem z przeprowadzonych weryfikacji było to, że masa krajowych prototypów i oficjalnych kopii ma tendencję do zwiększania się z upływem czasu, w odniesieniu do masy międzynarodowego prototypu.

Przed planowaną redefinicją kilograma podjęto decyzję o przeprowadzeniu ponownego porównania artefaktów przechowywanych w BIPM. Celem było potwierdzenie, czy utrzymuje się stuletni trend zmiany masy pomiędzy wzorcami przetrzymywanymi w tym samym miejscu. Porównanie to przeprowadzono w 2014 r., a więc po 25 latach od trzeciej weryfikacji. Był to dostateczny czas, aby potwierdzić utrzymujący się trend dryfu masy międzynarodowego prototypu, o ile byłby zauważalny w wyniku przeprowadzonych porównań. Okazało się jednak, że średnia zmiana masy wynosiła zaledwie 1 μg od czasu ostatniego porównania. Wynik ten różni się od obserwacji poczynionych na etapie wcześniejszych porównań. Przyjęty dryf, ok. 50 μg na 100 lat, musiałby doprowadzić do zmiany masy oficjalnych kopii w stosunku do IPK o ponad 10 μg od 1991 r., których jednak nie zaobserwowano. Wyniki badań sugerują, że IPK i sześć jego kopii zachowywały się stabilnie, co nie oznaczało, że wzorce utrzymują stałą masę na każdym etapie ich badania.

W trakcie porównań mas ustalono, że istotny wpływ na badane wzorce ma proces czyszczenia i mycia artefaktów, jednakże objawiający się w zróżnicowany sposób. Okazało się, że po pierwszym oczyszczeniu wszystkie wzorce kopie w stosunku do IPK utraciły od 8 μg do 16 μg . Artefakty, w celach badawczych, poddano też ponownemu oczyszczeniu, po którym nie stwierdzono w większości przypadków znaczących ubytków masy, a których już na pewno nie obserwowano po trzecim procesie

czyszczenia. Co więcej, zaobserwowano zjawisko przyrostu masy wzorców po wykonaniu czynności ich oczyszczenia. Początkowy wzrost masy IPK wynosił 0,02 μg na dzień, lecz był w dłuższym okresie czasu, do 300 dni, najmniejszym przyrostem ze wszystkich artefaktów, wynoszącym ok. 1 μg . Natomiast masy pozostałych wzorców kopii, w porównywalnym okresie 300 dni, wzrosły od 1,5 μg do 3 μg .

W dniu 20 maja 2019 r. weszła w życie nowa definicja kilograma w oparciu o stałą Plancka, co spowodowało, że zmienił się również sposób określania masy międzynarodowego prototypu kilograma IPK. Stała się nim wartość uzgodniona masy artefaktu IPK, uzyskiwana w wyniku odtwarzania kilograma przy użyciu metod pierwotnych powiązanych bezpośrednio ze stałą definiującą. Sposobami tymi są realizacje jednostki miary SI przy użyciu wagi Kibble'a i metodą XRCD (poprzez pomiar stałej sieci krystalicznej i objętości kuli krzemowej, jako wzorca masy). Po raz pierwszy, po przyjęciu nowej definicji kilograma, realizacje te były wykonane w 2020 r. przez sześć krajowych instytucji metrologicznych w postaci porównań kluczowych, na podstawie których w 2021 r. ustalono po raz pierwszy wartość uzgodnioną międzynarodowego prototypu kilograma równą: 1 kg – 2 μg (999,999 998 g), wyznaczoną z niepewnością standardową 20 μg . Międzynarodowy Komitet Miar przyjął zasadę, że porównania kluczowe kilograma, na podstawie których wyznacza się jego wartość uzgodnioną, odbywać się będą co dwa lata. Dlatego w 2022 r. odbyło się drugie takie porównanie, w którym uczestniczyło już osiem krajowych instytucji metrologicznych. W 2023 r. podano nową wartość uzgodnioną IPK równą: 1 kg – 7 μg (999,999 993 g), wyznaczoną również z niepewnością standardową 20 μg .

W przyszłości wartość uzgodniona kilograma będzie aktualizowana w wyniku regularnie prowadzonych porównań kluczowych, w których będą brały udział krajowe instytucje metrologiczne, dysponujące stanowiskami pomiarowymi, umożliwiającymi definicyjne odtwarzanie jednostki masy SI.

Bibliografia:

1. R. Davis: The SI unit of mass. *Metrologia*, vol. 40 (2003), s. 299-305.
2. 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 (2015), s. 310-316.
3. R. Davis, P. Barat, M. Stock: A brief history of the unit of mass: continuity of successive definitions of the kilogram. *Metrologia*, vol. 53 (2016), s. A12-A18.
4. M. Stock, S. Davidson, H. Fang, M. Milton, E de Mirandés, P. Richard, C. Sutton: Maintaining and disseminating the kilogram following its redefinition. *Metrologia*, vol. 54 (2017), s. S99-S107.

