

Realizacja jednostki masy

Realization of mass unit

Jolanta Wasilewska (Główny Urząd Miar)

W artykule przedstawiono okoliczności, w jakich narodził się pomysł nowej realizacji kilograma poprzez ustaloną międzynarodowo wartość stałej fizycznej Plancka. Wyjaśniono, jak nowa realizacja kilograma będzie przebiegać, a także jak do zaplanowanych zmian w dziedzinie metrologii na świecie przygotowuje się Główny Urząd Miar

The article outlines the circumstances in which the idea of a new kilogram was born through an internationally established Planck physical constant value. In an accessible way there is explained how the new implementation of the kilogram will look like, as well as the how to planned changes in the field of world metrology is preparing the Central Office of Measures.

Wstęp

W artykule przedstawiono realizację jednostki masy obecnie i po redefinicji kilograma. To ważne wydarzenie w skali światowej zostanie zapoczątkowane na 26. Generalnej Konferencji Miar CGPM (General Conference on Weights and Measures) w listopadzie 2018 roku. Na tym posiedzeniu zostanie podjęta uchwała o nowelizacji Międzynarodowego Układu Jednostek Miar SI. Wszystkie jednostki podstawowe (sekunda, metr, kilogram, amper, kelwin, mol i kandela) będą zdefiniowane poprzez stałe podstawowe, odpowiednio: częstotliwość cezową ($\Delta\nu_{Cs}$), prędkość światła w próżni (c), stałą Plancka (h), ładunku elementarnego (e), stałą Boltzmanna (k), stałą Avogadra (N_A) i skuteczność świetlną monochromatycznego promieniowania o częstotliwości 540 THz (K_{cd}). Nowe definicje zaczną obowiązywać od 20 maja 2019 roku.

Obecna, obowiązująca od 1901 roku i ustalona przez 3. Generalną Konferencję Miar (CGPM), definicja jednostki masy mówi, że kilogram jest jednostką masy, która jest równa masie międzynarodowego prototypu kilograma. Definicja ta zostanie zastąpiona nową, brzmiącą: „kilogram, oznaczenie kg, to jednostka masy SI. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej stałej Plancka h , wynoszącej $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$, wyrażonej w jednostce $J \cdot s$, która jest równa $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$, przy czym metr i sekunda określone są poprzez c i $\Delta\nu_{Cs}$ [1], co można przedstawić w postaci:

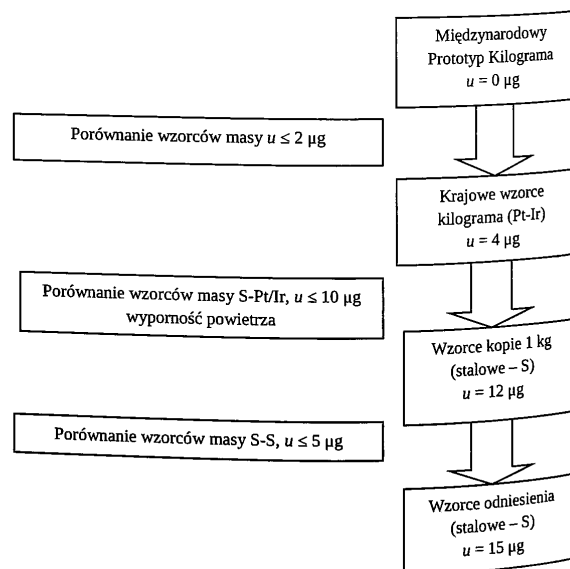
$$1 \text{ kg} = \left(\frac{h}{6,62607015} \right) 10^{34} \text{ m}^2 \cdot \text{s} \quad (1)$$

$$1 \text{ kg} = \frac{(299792458)^2}{(6,62607015)(9192631770)} 10^{34} \frac{h \cdot \Delta\nu_{Cs}}{c^2} \approx \approx 1,4755214 \cdot 10^{40} \frac{h \cdot \Delta\nu_{Cs}}{c^2} \quad (2)$$

Zostanie też określona realizacja definicji w praktyce (*mise en pratique*).

Realizacja jednostki masy obecnie

Realizacja jednostki masy od Międzynarodowego Prototypu Kilograma IPK (International Prototype of Kilogram) do stalowych wzorców odniesienia (końcowy



Rys. 1. Obecny schemat spójności pomiarowej (poglądowy), przedstawiający kolejne etapy przekazywania jednostki masy od Międzynarodowego Prototypu Kilograma do poszczególnych klas dokładności wzorców masy [2]

Tabela 1. Międzynarodowy Prototyp Kilograma i wzorce kopie [2]

Lp.	Oznaczenie wzorca	Ranga wzorca	Data pierwszego porównania	Częstość stosowania wzorców w porównaniach
1.	IPK	Międzynarodowy prototyp kilograma	1880	jedno ważenie/30–50 lat
2.	K1	Oficjalne kopie IPK	1889	jedno ważenie dwóch kopii co 10 lat
3.	7		1925	
4.	8 (41)		1905	
5.	32		1905	
6.	43		1939	
7.	47		1939	
8.	25	Specjalne zastosowanie prototypów	1958	jedno ważenie co 5 lat
9.	73		1988	
10.	91		2004	
11.	9	Ograniczone zastosowanie wzorców	1889	jedno ważenie w roku
12.	31		1889	
13.	650		1979	
14.	42'	Wzorce do bieżącego stosowania – wzorce robocze	1953	cztery ważenia w roku
15.	63		1974	
16.	77		1992	
17.	88		2004	
18.	97		–	
19.	103		–	

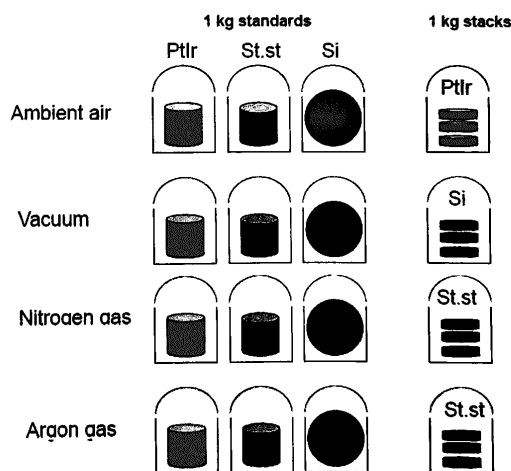
użytkownik) przebiega zgodnie ze schematem hierarchicznego układu sprawdzeń (rys. 1) [2].

Międzynarodowe Biuro Miar (BIPM) organizuje i przeprowadza międzynarodowe porównania państwowych wzorców jednostki masy – prototypów 1 kg oraz wzorcuje wzorce masy 1 kg dla krajowych instytutów metrologicznych (NMI) i także dla innych użytkowników. Porównania polegają na wyznaczeniu mas przekazanych obiektów w odniesieniu do wzorców roboczych należących do BIPM i innych krajowych prototypów 1 kg. W tabeli 1 zestawiono wzorce należące do Międzynarodowego Biura Miar.

Od 2011 roku Międzynarodowe Biuro Miar posiada także zestaw 12 wzorców odniesienia ERMS (Ensemble of Reference Mass Standards), związanych z Międzynarodowym Prototypem Kilograma, który stanowi wartość odniesienia w porównaniach kluczowych. Zestaw składa się z następujących wzorców masy: 4 kul z monokryształu krzemu o naturalnym składzie izotopowym (Si), 4 walców platynowo-irydowych (Pt-Ir), 4 walców stalowych (S-S) oraz dodatkowo 3 artefaktów Pt-Ir, 3 artefaktów z monokryształu krzemu i 6 artefaktów ze stali do pomiaru efektów powierzchniowych. Wzorce i artefakty przechowywane są w argonie, azocie, w powietrzu i w próżni (rys. 2). ERMS odtwarza wartość masy w oparciu o średnią ważoną wartości mas 12 wzorców i stanowi znacznie bardziej stabilne, solidne, wiarygodne

źródło odniesienia niż pojedynczy prototyp kilograma [3]. Zestaw brał udział w specjalnym wzorcowaniu w 2014 roku.

Obecnie (dane CCM z 2017 r.) zestaw ERMS składa się z 20 wzorców: 6 wzorców w powietrzu (2 Pt-Ir, 2 Si, 2 S-S), 3 wzorców w argonie (1 Pt-Ir, 1 Si, 1 S-S), 3 wzorców w azocie (1 Pt-Ir, 1 Si, 1 S-S), 4 wzorców w próżni (4 S-S) oraz 2 wzorce stalowe i 2 kule z monokryształu krzemu [4].



Rys. 2. Wzorce odniesienia ERMS związane z Międzynarodowym Prototypem Kilograma IPK [4]

Wzorce Międzynarodowego Biura Miar były porównywane z Międzynarodowym Prototypem Kilograma (IPK) i między sobą w następujących latach (w nawiasie podano rok, w którym uczestniczył IPK) [5]:

- 1899–1911 – pierwsze okresowe porównanie (bez IPK),
- 1939–1953 – drugie okresowe porównanie (1946 r.),
- 1988–1992 – trzecie okresowe porównanie (1989 r.),
- 2013–2014 – nadzwyczajne wzorcowanie (2014 r.).

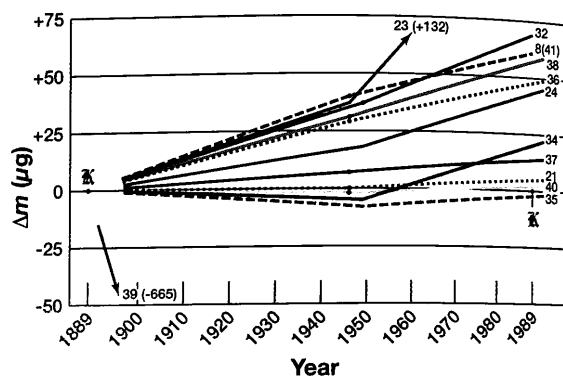
Polski państwowy wzorzec masy – prototyp kilograma nr 51 (walec wykonany ze stopu Pt-Ir) porównywano w BIPM dwukrotnie: w 1951 r. ($1 \text{ kg} + 0,185 \text{ mg}$) między innymi z prototypami kilograma nr 31 (Bureau International), nr 25 (Observatoire de Paris) oraz prototypami kilograma z innych krajów: nr 49 z Austrii i nr 50 z Kanady i w 1990 r. ($1 \text{ kg} + 0,227 \text{ mg}$, niepewność standardowa $2,3 \mu\text{g}$). W świadectwie wzorcowania z 1990 r. brak danych, z jakimi wzorcami międzynarodowymi polski prototyp kilograma był porównywany. Następne porównania prototypu kilograma nr 51 planowane są w latach 2019–2021. Do tego czasu Pracownia Wagi i Wzorców Masy musi stosować opracowany przez BIPM model matematyczny opisujący zmiany masy w czasie z niepewnością $0,008 \text{ mg}$. Dla kopii nr 51 wyznaczono zależność: $m = m_0 + (\Delta m_0 + k \cdot \delta m_D)$, gdzie: m_0 , Δm_0 – masa wyrażona w kg i błąd masy wyrażony w mg, dane ze świadectwa wzorcowania wystawionego w 1952 r. przez BIPM, k – bezwymiarowy współczynnik określający liczbę miesięcy, które minęły od wystawienia świadectwa wzorcowania do dnia wykonania ekstrapolacji, δm_D – wyznaczony doświadczalnie przez BIPM dryft masy, który wynosi $0,1886 \mu\text{g/miesiąc}$ [6].

Pracownia Wagi i Wzorców Masy zapewnia jednolitość miar w kraju w zakresie pomiarów masy. Przekazywanie jednostki masy jest realizowane zgodnie z hierarchicznym układem sprawdzeń od Międzynarodowego Prototypu Kilograma IPK, poprzez wzorce robocze BIPM, polski prototyp 1 kg nr 51, wzorce kopie 1 kg , wzorce odniesienia klasy dokładności E_1 , wzorce masy klasy dokładności E_2 , wzorce masy klas dokładności F_1 , F_2 , M_1 , wagi nieautomatyczne i wagi automatyczne. Do przekazywania jednostki masy w Polsce wykorzystywane jest stanowisko pomiarowe do wzorcowania wzorców kopii 1 kg . W skład stanowiska wchodzi następujące wzorce i przyrządy pomiarowe:

- prototyp kilograma nr 51,
- komparator masy 1 kg ,
- stacja klimatyczna do określania temperatury, wilgotności powietrza i ciśnienia atmosferycznego,
- komputer sterujący komparatorem, który służy również do obliczania wyników pomiaru.

Przygotowania do redefinicji kilograma

Powodem, dla którego zdecydowano się powiązać jednostkę masy ze stałą fizyczną i wykorzystać do jej odtwarzania zjawiska fizyczne, były zmiany masy większości kopii w odniesieniu do międzynarodowego prototypu kilograma. Był to trend wzrostowy, który potwierdziły porównania przeprowadzone w latach 1889–1992, oszacowany dryft masy kopii wobec IPK wynosił do $50 \mu\text{g}$ na sto lat [7].



Rys. 3. Zmiany masy oficjalnych kopii kilograma w odniesieniu do międzynarodowego prototypu kilograma [15]

W celu wyeliminowania niekorzystnego zjawiska zmienności masy wzorca materialnego w czasie, podjęto decyzję o redefinicji jednostki masy w oparciu o stałą fizyczną Plancka (h). Do realizacji tego pomysłu wybrano dwa projekty (realizacje pierwotne kilograma): International Avogadro Coordination (IAC) i wagę wata.

Pierwszy projekt wiąże masę kuli wykonanej z monokryształu krzemu z następującymi wielkościami: stałą sieci krystalicznej a , składem izotopowym $\sum x(^i\text{Si}) = 1$, względną masą atomową każdego izotopu krzemu $A_r(^i\text{Si})$, objętością kuli V_{Si} , masą zanieczyszczeń m_{deficit} , masą warstwy powierzchniowej kuli m_{SL}

$$m_{\text{sphere}} = \frac{2hR_{\infty}}{c\alpha^2} \frac{\sum x(^i\text{Si})A_r(^i\text{Si})}{A_r(e)} \frac{8V_{\text{core}}}{a^3} - m_{\text{deficit}} + m_{\text{SL}} \quad (3)$$

gdzie: $2hR_{\infty}/(c\alpha^2)$ jest masą elektronu, $\sum x(^i\text{Si})A_r(^i\text{Si})/A_r(e)$ jest średnim stosunkiem masy krzemu do masy elektronu, a $8V_{\text{core}}/a^3$ jest liczbą atomów krzemu w kuli. We wzorze występują dwie stałe fizyczne: R_{∞} stała Rydberga ($u = 5,9 \cdot 10^{-12}$) i α stała struktury subtelnej ($u = 2,3 \cdot 10^{-10}$) (metoda XRCD – X-Ray Crystal Density) [8].

Drugi projekt wykorzystuje wagę wata i wiąże wielkości mechaniczne i elektryczne, opierając jednostkę masy na stałej fizycznej Plancka [9]



$$m = h \left(\frac{bf^4}{4} \right) \frac{1}{gv} \quad (4)$$

gdzie: h – stała fizyczna Plancka, f – doświadczalna częstotliwość, b – bezwymiarowa doświadczalna wielkość. Obie wielkości związane są z pomiarami elektrycznymi prądu i napięcia mierzonymi kwantowymi wzorcami elektrycznymi: prąd pośrednio z rezystancji (przy wykorzystaniu kwantowego efektu Halla), napięcie przy zastosowaniu kwantowego zjawiska Josephsona, przyspieszenie ziemskie g ultraczułym grawimetrem, prędkość v pośrednio interferometrem laserowym, a czas t cezowym zegarem atomowym.

W celu realizacji nowej definicji kilograma, opartej na stałej fizycznej Plancka, Komitet Doradczy ds. Masy i Wielkości Pochodnych (Consultative Committee for Mass and Related Quantities – CCM, zalecenie G1, 2013) sformułował cztery cele:

1. **zgodność** – co najmniej trzy niezależne eksperymenty, w tym projekty wagi wata i IAC, w których otrzymano wartości stałej Plancka ze względną niepewnością standardową nie większą niż $5 \cdot 10^{-8}$,
2. **niepewność** – przynajmniej jeden z ww. wyników powinien mieć względną niepewność standardową nie większą niż $2 \cdot 10^{-8}$,
3. **spójność** – kopie IPK z BIPM, zestaw wzorców odniesienia ERMS, wzorce masy stosowane w wadze wata i w metodzie IAC powinny być bezpośrednio, na ile to możliwe, porównane z IPK,
4. **walidacja** – procedury do dalszej realizacji i przekazywania kilograma opisane w *mise en pratique* powinny być zwalidowane zgodnie z zasadami CIPM MRA (Porozumienia o wzajemnym uznawaniu państwowych wzorców jednostek miar oraz świadectw wzorcowania).

Cele zostały zrealizowane w następujący sposób:

1. w porównaniach pilotażowych *CCM Pilot Study: comparison of realization of the kilogram* wzięły udział trzy wagi wata: LNE/Francja, NIST/USA, NRC/Kanada i dwie kule krzemowe AVO28-S5 i AVO28-S8 mierzone niezależnie przez PTB/Niemcy i NMIJ/Japonia w projekcie IAC. Tylko trzy realizacje osiągnęły zamierzoną względną niepewność standardową nie większą niż $5 \cdot 10^{-8}$: National Research Council (NRC)/Kanada $1,8 \cdot 10^{-8}$, International Avogadro Coordination (IAC) $2,0 \cdot 10^{-8}$ i National Institute of Standards and Technology (NIST) $3,4 \cdot 10^{-8}$ [10];
2. najmniejszą względną niepewność standardową $2 \cdot 10^{-8}$ otrzymano na wadze wata z Kanady i w projekcie IAC;

3. w 2014 r. przeprowadzono porównania oficjalnych kopii kilograma z międzynarodowym prototypem kilograma IPK (specjalne wzorcowanie); jak się okazało kopie mają bardzo dobrą stabilność, różnica wynosi tylko kilka mikrogramów w porównaniu z 1992 r.

Ponadto w 2016 r. BIPM porównał dwie kopie robocze spójne z IPK, (w próżni pierwszy zestaw, w powietrzu drugi zestaw) z dwoma zestawami wzorców należących do uczestników porównań pilotażowych CCM Pilot Study. Każdy uczestnik przygotował własny zestaw, w skład którego wchodził obowiązkowo jeden wzorec Pt-Ir i jeden dodatkowy wzorec Pt-Ir, wzorec stalowy lub kula Si – wszystkie wywzorcowane w próżni na przyrządach pomiarowych realizujących nową jednostkę masy, drugi zestaw składał się z dwóch wzorców stalowych wywzorcowanych w powietrzu. Warunkiem przystąpienia do projektu było posiadanie stanowiska pomiarowego, które pozwoli zrealizować jednostkę masy zgodnie z nową definicją kilograma, z niepewnością standardową w zakresie $(20 \div 200) \mu\text{g}$. Do obliczeń zastosowano wartość stałej fizycznej Plancka $h = 6,626\,070\,040 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, rekomendowaną przez CODATA (Committee on Data for Science and Technology) w 2014 r. [11].

Realizacja jednostki masy po redefinicji kilograma

Po redefinicji kilograma, czyli 20 maja 2019 r. przekazywanie jednostki masy będzie przeprowadzane etapami.



Rys. 4. Spójność pomiarowa po redefinicji jednostki miary masy [12]



Powiększenie niepewności obecnych wzorców masy o niepewność IPK

Niepewność standardowa stałej Plancka ($10 \mu\text{g}$) zostanie przeniesiona na IPK. W związku z tym wszystkie wzorce państwowe będą miały większą niepewność. Polski wzorec kilograma nr 51 będzie miał niepewność $10,3 \mu\text{g}$ zamiast $2,3 \mu\text{g}$. Międzynarodowe Biuro Miar (BIPM) powiadomi wszystkie krajowe instytucje metrologiczne (NMI) o proponowanych zmianach. BIPM nie planuje wydania poprawki do poprzednich świadectw wzorcowania. Do czasu ustalenia „consensus value”, BIPM będzie wykonywało wzorcowania wobec wzorców roboczych spójnych z IPK, biorąc pod uwagę dodatkową niepewność $10 \mu\text{g}$ pochodzącą od IPK. Po 20 maja 2019 r. krajowe instytucje metrologiczne będą miały za zadanie włączyć dodatkową niepewność pochodzącą od IPK do budżetu niepewności. Informacja ta ma być podana w świadectwie wzorcowania.

Rozpowszechnianie ustalonej wartości „consensus value”

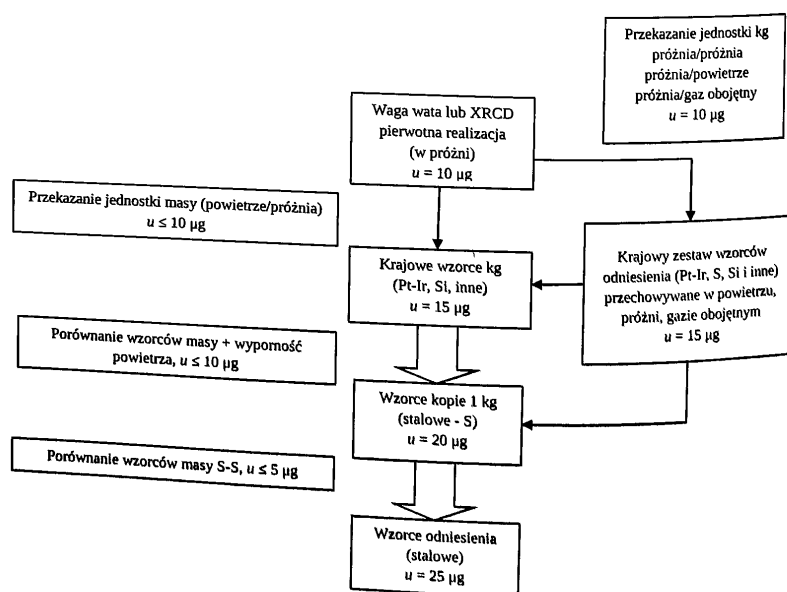
Porównania kluczowe będą powiązane z wzorcami roboczymi BIPM i zestawem wzorców odniesienia ERMS, aby zachowana była ciągłość realizacji jednostki kilograma sprzed redefinicji. BIPM będzie pilotem porównań. Porównania nowych realizacji pierwotnych kilograma będą równoległe lub dwustronne z BIPM, co pozostawi uczestnikom wybór. Będzie także istniała możliwość wykonania porównań wzorców kilograma na obecnych zasadach. Udział w porównaniach kluczowych będą mogły brać tylko te krajowe instytucje metrologiczne, które opublikowały swoje wyniki z niepewnością względną mniejszą niż $5,0 \cdot 10^{-7}$ [13]. BIPM będzie wykorzystywał w tych porównaniach wzorce robocze i zestaw wzorców ERMS uczestniczący w ostatnich porównaniach kluczowych. Za każdym razem, gdy niezależna realizacja będzie brać udział w trwającym porównaniu, wartość odniesienia dla porównania kluczowego będzie podlegać przeglądowi przez Komitet Doradczy ds. Masy i Wielkości Pochodnych CCM. Wartość odniesienia porównań kluczowych KCRV (key comparison reference value) zostanie obliczona przy użyciu uznanej metodologii (na przykład przy użyciu średniej ważonej). Ustalona wartość (consensus value) będzie pochodzić od dostarczonych

przez uczestników wyników. Niepewność standardowa consensus value powinna pozostać na poziomie $10 \mu\text{g}$. Aktualizacja tej wartości będzie nadzorowana, aby uniknąć znaczących zmian, po dodaniu nowych wyników porównań. Aby utrzymać stabilność consensus value, może zapadnąć decyzja o kolejnych porównaniach, które będą odzwierciedlać stabilność użytego wzorca w czasie. Wyniki poddane będą analizie statystycznej. Początkowo ustalona wartość (consensus value) będzie oparta o pomiary wzorców roboczych BIPM [13].

Prototyp kilograma, kula krzemowa, zestaw wzorców odniesienia wywzorcowane metodą pierwotną na wadze wata lub na komparatorze próżniowym wobec kuli krzemowej z projektu IAC staną się wzorcami pierwotnymi [2].

Pierwotne realizacje kilograma (wagi wata, metoda XRCD i inne) będą dostępne w różnych krajach na świecie. Aby pierwotne metody realizacji jednostki masy były dostępne dla innych użytkowników, muszą być zwalidowane podczas okresowych kluczowych porównań organizowanych przez Komitet Doradczy ds. Masy i Wielkości Pochodnych (CCM), zgodnie z zasadami CIPM MRA. Podczas porównań zostanie potwierdzony stopień równoważności zgłoszonej metody, czyli spójność z wartością odniesienia porównań kluczowych KCRV. Dla tych porównań KCRV będzie nazywała się ustaloną wartością (consensus value), jak wspomniano powyżej. Następnie niepewność CMC (Calibration and Measurement Capabilities) każdego uczestnika porównań, który spełnił kryteria porównań, zostanie wpisana do bazy danych KCDB (Key Comparison Database) [2].

Pierwsze pierwotne wzorce kilograma spójne ze stałą fizyczną Plancka i wywzorcowane przy użyciu ww.



Rys. 5. Łańcuch spójności pomiarowej po redefinicji kilograma [2]



realizacji pierwotnych będą dostępne po 2023 r. W latach 2018–2022, wywzorcowane w ten sposób wzorce masy, byłyby obarczone zbyt dużą niepewnością [14].

BIPM odegra ważną rolę w zapewnieniu światowej jednorodności rozpowszechniania kilograma poprzez organizowanie porównań wzorców masy należących do krajowych instytutów metrologicznych (NMI). W okresie przejściowym ustalona w wyniku tych porównań wartość (consensus value) będzie rozpowszechniana wśród uczestników porównań, aby zapewnić jednolitość pomiarów masy na całym świecie. BIPM zapewni stabilne odniesienie do tych porównań poprzez najdokładniejsze i skuteczne środki realizacji kilograma, aby wesprzeć solidny międzynarodowy system realizacji i rozpowszechniania kilograma. BIPM będzie w dalszym ciągu zapewniać wzorcowanie krajowym instytutom metrologicznym, które nie wykonują pierwotnej realizacji kilograma. Lista planowanych porównań w dziedzinie masy w latach 2020–2023 znajduje się na stronie internetowej BIPM.

Realizacja jednostki masy po redefinicji kilograma w Głównym Urzędzie Miar

Pracownia Wag i Wzorców Masy Głównego Urzędu Miar także przygotowuje się do realizacji jednostki masy po redefinicji kilograma. Dotychczasowe całkowicie zautomatyzowane stanowisko państwowego wzorca jednostki miary masy 1 kg, komparator o obciążeniu max. 1011 g, z dz. el. $d = 1 \mu\text{g}$, zostanie zastąpione modułowym stanowiskiem, w skład którego wchodzić będzie automatyczny próżniowy komparator masy z adiustacją zewnętrzną o charakterystyce: obciążenie max. $\geq 1 \text{ kg}$ z dz. el. $d = 0,1 \mu\text{g}$. Modułowy komparator masy jest już zakupiony i obecnie znajduje się w fazie testowania. Stanowisko państwowego wzorca jednostki miary masy 1 kg zostanie też wyposażone w krajowy zestaw wzorców odniesienia [15 wzorców kopii 1 kg: 2 walce stalowe, 10 walców stalowych z główką, 2 wzorce stalowe zespołowe (100 g ÷ 500 g) i kulę krzemową].

Podsumowanie

Historyczne wydarzenie, jakim jest redefinicja jednostek miar, zbiega się z ważnymi datami dla naszego kraju: 100-leciem odzyskania niepodległości (11 listopada 2018 r.) oraz 100-leciem powstania Głównego Urzędu Miar (1 kwietnia 2019 r.). W dniach 13–16 listopada 2018 r. 26. Generalna Konferencja Miar podejmie uchwałę o redefinicji Międzynarodowego Układu Jednostek Miar, a jego oficjalne wdrożenie nastąpi w dniu 20 maja 2019 r. Kilogram, ostatnia podstawowa jednostka miary, zdefiniowana od ponad 100 lat przez wzorzec materialny, zostanie ustalona poprzez przyjęcie dokładnej wartości

liczbowej stałej Plancka. Dla Pracowni Wag i Wzorców Masy GUM to nowe wyzwanie związane z nowoczesnym komparatorem, rozbudowanym modułem pomiarowym umożliwiającym pomiar masy w próżni i w osłonie gazów szlachetnych. Ale najistotniejszą sprawą dla licznych klientów Pracowni Wag i Wzorców Masy jest przekazywanie jednostki masy z jak najmniejszą niepewnością, o czym metrologzy GUM nigdy nie zapominają, wyposażając Pracownię w najnowocześniejszą aparaturę i szkoląc się na warsztatach w najlepszych zagranicznych instytutach metrologicznych.

Literatura

- [1] The International System of Units (SI). Draft of the ninth SI Brochure, 5 February 2018.
- [2] Stock M., Davidson S., Fang H., Milton M., de Mirandes E., Richard P., Sutton C.: Maintaining and disseminating the kilogram following its redefinition. *Metrologia* vol. 54, (2017), s. S99-S107.
- [3] Lenard E., Wiśniewski W.: Państwowy wzorzec jednostki masy po redefinicji kilograma. Stan obecny i propozycje działań GUM w zakresie praktycznej realizacji i przekazywania nowej jednostki masy. Opracowanie GUM.
- [4] Estefania de Mirandes i in.: Present status of the BIPM ensemble of mass standards. Prezentacja CCM, 18th May 2017.
- [5] Davis S. R., Barat P., Stock M.: A brief history of the unit of mass: continuity of successive definitions of the kilogram, *Metrologia* vol. 53 (2016), s. A12-A18.
- [6] Ossowski L. R.: Wykorzystanie komparatora próżniowego do przekazywania jednostki miary masy opartej na nowej definicji kilograma. *Biuletyn GUM* nr 1-2 (2015), s. 20-26.
- [7] Stock M. i in.: 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.
- [8] Fujii K., Bettin H. i in.: Realization of the kilogram by the XRCD method, *Metrologia* vol. 53 (2016), s. A19-A45.
- [9] *Mise en pratique* for the definition of the kilogram in the SI. Draft for Appendix 2 of the SI Brochure for the "Revised SI", Version 11.0 (2018).
- [10] Bettin H., Schlamminger S.: Realization, maintenance and dissemination of the kilogram in the revised SI, *Metrologia*, vol. 53 (2016), s. A1-A5.
- [11] Stock M. i in.: A comparison of future realizations of the kilogram, *Metrologia* vol. 55, (2018), s. T1-T7.
- [12] Philippe R., Hao F., Davis R.: Foundation for the redefinition of the kilogram, *Metrologia* vol. 53 (2016), s. A6-A11.
- [13] CCM short note on the dissemination process after the proposed redefinition of the kilogram, 24th May 2018, Version 1.3.
- [14] Nilsen L.: Disseminating the unit of mass from multiple primary realizations, *Metrologia* vol. 53 (2016), s. 1306-1316.
- [15] Girard G.: The Third Periodic Verification of National Prototypes of the Kilogram (1988–1992), *Metrologia* vol. 31 (1994), s. 317-336.

