

Analiza strategiczna polskiego projektu wagi Kibble'a

Strategic analysis of the Polish project of Kibble balance

Tadeusz Szumiata, Maciej Dobieszewski, Andrzej Hantz, Wojciech Wiśniewski, Jerzy Szutkowski, Arkadiusz Podgórn, Mariusz Janeczko

Główny Urząd Miar, w wyniku konsultacji z polskim środowiskiem przemysłowym i akademickim, podjął decyzję o powstaniu zespołu roboczego, którego głównym celem było przeprowadzenie analizy celowości budowy w Polsce wagi Kibble'a wg niezależnego projektu. Inicjatywa ta nawiązuje bezpośrednio do postanowień BIPM, których celem jest ostateczne odejście od dotychczasowego wzorca masy, będącego materialnym artefaktem i zastąpienie go wzorcem opartym na zjawiskach fizyki klasycznej i kwantowej. Zespół wskazał główne argumenty przemawiające za bezpośrednim zaangażowaniem się w prace związane ze skutkami redefinicji kilograma. Za główny powód uznano oczywiste przekonanie, że nowoczesna metrologia jest motorem rozwoju gospodarki narodowej. Poza tym Polska, uznawana za kraj będący liderem regionu Europy Środkowo-Wschodniej i jeden z filarów Unii Europejskiej, nie może pozostawać w tyle za krajami wysoko rozwiniętymi i rozwijającymi się na różnych kontynentach, które już zaczęły opracowywać własne projekty wag Kibble'a. Przeprowadzona analiza strategiczna polskiego projektu obejmowała wybór właściwej koncepcji, sporządzenie szacunkowego kosztorysu i terminarza działań, wskazanie najistotniejszych wyzwań technicznych oraz potencjalnych źródeł finansowania projektu, jak również zarysowała perspektywy realizacji tego przedsięwzięcia w oparciu o przemysł krajowy i współpracę międzynarodową.

The Central Office of Measures, after consultations with Polish industrial and academic environment, decided to create a working team whose main goal is to analyse the purposefulness of constructing the Kibble balance in Poland according to an independent project. This initiative refers directly to the provisions of the BIPM, the aim of which is to definitively move away from the existing mass standard, which is a material artefact, and replace it with a model based on the phenomena of classical and quantum physics. The team pointed out the main arguments for direct involvement in work related to the effects of the kilogram redefinition. The main reason is the obvious conviction that modern metrology is the driving force for the development of the national economy. In addition, Poland, considered as a country that is a leader of Central and Eastern Europe and one of the pillars of the European Union, can not be left behind highly developed and developing countries on various continents that have already started to develop their own Kibble balances. The strategic analysis of the Polish project includes the choice of the right concept, preparation of an costing estimate and schedule of activities, an indication of the most important technical challenges and potential sources for the project financing as well as outlining the perspectives for the implementation of this project based on domestic industry and international cooperation.

Wprowadzenie

Konieczność zastąpienia dotychczasowego wzorca kilograma, w postaci artefaktu, jest już niekwestionowanym paradygmatem w międzynarodowym środowisku metrologicznym. Pierwotną motywacją do tego radykalnego zwrotu w podejściu do metrologii masy stał się fakt wykrycia znaczących fluktuacji masy Międzynarodowego Prototypu Kilogramu IPK (International Prototype of the Kilogram), utrzymywanego w Międzynarodowym Biurze Miar BIPM (Bureau International des Poids et Mesures)

w Sèvres pod Paryżem. Ten platynowo-irydowy walec (Le Grand K), o wysokości równej średnicy wynoszącej ok. 39 mm, zaczął wykazywać odmienne trendy zmiany masy niż inne kopie porównawcze [1, 2]. Było to sygnałem ostrzegawczym, motywującym do rozpoczęcia prac nad nowym wzorcem kilograma, który docelowo opierałby się na zjawiskach i stałych fizycznych, a nie na jednym, nadrzędnym obiekcie materialnym. Pierwsza poważna rekomendacja tego typu działań pojawiła się podczas 23. Generalnej Konferencji Miar CGPM (General Conference on Weights and Measures) w 2007 roku [2].

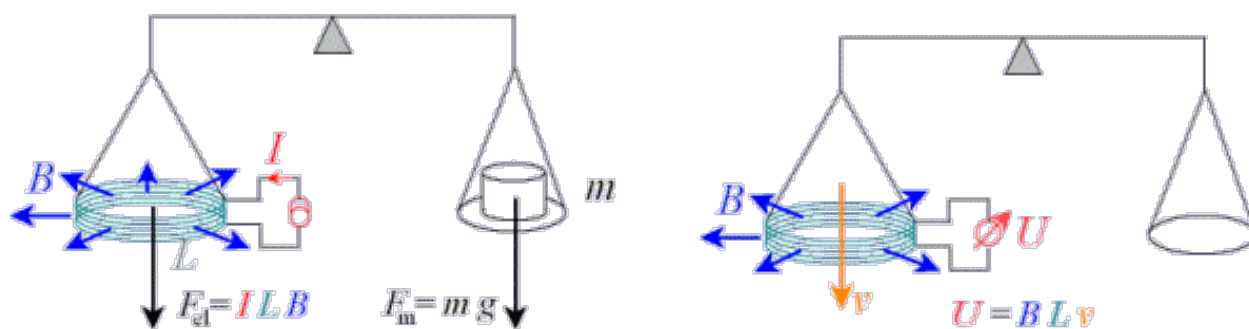
Warunki strategii metrologicznej dochodzenia do redefinicji wzorca kilograma ustalono podczas 12. posiedzenia CCM BIPM (Consultative Committee for Mass and Related Quantities) w 2010 roku [3]. W wyniku analiz i dyskusji zrodziły się dwie alternatywne koncepcje realizacji nowego wzorca kilograma: jedna odnosząca się do stałej Plancka h , a druga – do stałej Avogadro N_A [2]. Po kilku latach prób i weryfikacji zwyciężyło przekonanie, że tzw. „projekt Avogadro” jest mniej perspektywiczny, ponieważ po części opiera się wciąż na artefakcie – w tym przypadku w postaci precyzyjnie wykonanej kuli krzemowej, przy czym barierą nie do pokonania okazało się uzyskanie odpowiedniej czystości izotopowej krzemu oraz jednorodności struktury krystalicznej monokryształu. Z tego względu zdecydowano, by skoncentrować się przede wszystkim na pierwszej idei, której skonkretyzowaną formą jest konstrukcja tzw. wagi Kibble’a (zgodnie z zaleceniami BIPM dawna nazwa watt balance została zastąpiona nazwą Kibble balance, na cześć niezjącego twórcy tego rozwiązania Bryana Kibble’a z National Physical Laboratory w Wielkiej Brytanii). Jej działanie opiera się na elementarnych prawach mechaniki (równowaga sił) i elektrodynamiki (siła elektrodynamiczna oraz prawo indukcji Faradaya). Dla zapewnienia odpowiedniej precyzji pomiarów praktyczna realizacja wagi Kibble’a wymaga wykorzystania kwantowych wzorców wielkości elektrycznych (w oparciu o efekt Josephsona i kwantowy efekt Halla [4]). Takie wzorce istnieją od dawna i są powszechnie wykorzystywane w praktyce metrologicznej. Stąd wynika kolejna motywacja do prac nad nowym wzorcem kilograma. Jeśli bowiem odniesiemy go do kwantowych wzorców wielkości elektrycznych (napięcia, oporu elektrycznego czy prądu), to zapewnimy spójność metrologiczną jednostek mechanicznych i elektrycznych. A zatem redefinicji kilograma towarzyszy redefinicja znacznej części układu jednostek SI [5]. Wspomniane zmiany zostały już usankcjonowane podczas historycznej 26. Generalnej Konferencji Miar CGPM, która odbyła się

w Wersalu w dniach 13–16 listopada 2018 roku. W ostatnim dniu obrad, 16 listopada przegłosowano rezolucję redefiniującą układ SI. Dokument, zredagowany w języku francuskim i angielskim [6], nie narzuca sposobu realizacji jednostek miar, ale wiąże je z ustalonymi wartościami kilku głównych stałych podstawowych. Jednostka masy kilogram została powiązana ze stałą Plancka h (podstawową stałą fizyki kwantowej), chociaż w rzeczywistości konieczne jest też odniesienie jej do innych stałych (między innymi do prędkości światła c oraz częstości cezowej $\Delta\nu_{Cs}$).

Zachodzące obecnie rewolucyjne zmiany w światowej metrologii nie powinny być biernie obserwowane przez polskie środowisko metrologiczne. Z tego względu Główny Urząd Miar, w porozumieniu z przedstawicielami polskiego przemysłu oraz polskich uczelni i instytutów badawczych, podjął decyzję o powołaniu Zespołu Roboczego, którego celem jest strategiczna analiza celowości opracowania polskiego projektu wagi Kibble’a. Pozytywna rekomendacja będzie równoznaczna z przekształceniem się Zespołu w grupę nadzorującą realizację projektu. Wyniki analizy strategicznej projektu zostały przedstawione w dalszej części artykułu. Analiza obejmowała m.in. przegląd analogicznych projektów już realizowanych na świecie, sprecyzowanie założeń projektu polskiego, sporządzenie szacunkowego kosztorysu, wstępnego harmonogramu działań oraz wskazanie źródeł finansowania. Sporządzono krytyczną ocenę celowości i wykonalności projektu oraz sformułowano rozstrzygające konkluzje.

Projekty na świecie – przegląd

Ogólny schemat działania wagi Kibble’a przedstawia rys. 1 w jej dwóch trybach pomiarowych (na stronie internetowej BIPM określanych jako weighing i moving), które zostaną szczegółowo omówione poniżej.



Rys. 1. Schemat działania wagi Kibble’a w dwóch trybach pomiarowych (weighing i moving).
 Ilustracja ze strony internetowej BIPM
<https://www.bipm.org/en/bipm/mass/watt-balance/>



Projekt NIST (amerykański)

Jeden z najbardziej zaawansowanych i najlepiej udokumentowanych projektów wagi Kibble'a jest realizowany w National Institute of Standards and Technology (NIST) w USA. Na jego przykładzie przedstawiona zostanie istota działania wagi, bazująca na pomysłach Bryana Kibble'a z 1975 r. [7, 8].

W uproszczeniu zasada działania układu amerykańskiego opiera się na równoważeniu się siły grawitacyjnej, powstałej na skutek położenia masy badanej, z siłą elektrodynamiczną, wytworzoną w elektromagnesie przymocowanym do drugiego ramienia wagi, co pokazuje równanie (1), stanowiące ilościowy opis działania urządzenia w pierwszym trybie pomiarowym. W równaniu tym m jest masą badaną, g jest przyspieszeniem ziemskim, B natomiast indukcją magnetyczną pola magnetycznego, wytwarzanego przez układ magnesów stałych lub elektromagnes, a L jest długością uzwojenia cewki. Iloczyn $B \cdot L$ wyznacza się w drugim trybie pomiarowym, podczas którego mierzy się napięcie indukowane w cewce na skutek jej ruchu względem magnesu. Zmierzone w ten sposób napięcie jest dane wzorem (2), w którym v oznacza prędkość cewki wewnątrz magnesu. Wstawiając jeden wzór do drugiego, otrzymujemy finalną formułę (3) na masę badaną [9].

$$mg = BL \cdot I \quad (1)$$

$$U = BL \cdot v \quad (2)$$

$$m = \frac{U \cdot I}{g \cdot v} \quad (3)$$

Projekt ten z biegiem lat ulegał zmianom i rozwojowi, jednak Amerykanie przyjęli strategię, aby każdą głębszą zmianę wprowadzać w wybudowanym od nowa urządzeniu, którym zajmował się nowy zespół, utrzymując przy tym wersję poprzednią [10]. W ten sposób powstało kilka generacji amerykańskiej wagi Kibble'a, różniących się szczegółami i zespołem ludzi, opiekujących się nimi. Najnowszą, powstałą w 2014 roku, jest wersja czwarta o nazwie NIST-4, która przed budową była projektowana przez trzy lata [11]. Zespół amerykański w kolejno wydawanych publikacjach opisywał nie tylko szczegóły konstrukcyjne fragmentów projektu poszczególnych generacji oraz ich osiągi, ale również odnosił się do takich kwestii, jak:

- analiza zmian krótko- i długofalowych przyspieszenia ziemskiego w bezpośrednim otoczeniu badanej masy, w celu uzyskania niepewności jej pomiaru w czasie działania wagi nie większej niż 45 nm/s^2 [12], wraz z teoretycznym modelowaniem jego rozkładu w zależności od rozmieszczenia komponentów wagi [13];

- wpływ wibracji mechanicznych podłoża i silników o częstotliwości rzędu 30 Hz na aparaturę poprzez pomiar częstotliwości rezonansowej mechanicznych drgań własnych, co wymusiło próbkowanie sygnałów mierzonych (napięcie i prędkość) z częstotliwością nie mniejszą niż 120 Hz [11];
- wzorcowanie użytych rezystorów (dla NIST-4 są to 100 Ω oporniki), wychodząc od kwantowego efektu Halla i minimalizując niepewność tego procesu tak, aby finalnie otrzymać standardową niepewność względną nie większą niż $5 \cdot 10^{-9}$ [14];
- opis programowalnych bipolarnych źródeł prądowych w NIST-3 i NIST-4, izolowanych galwanicznie od potencjału ziemi (rezystancja $>10^{12} \Omega$; zakres regulacji $\pm 20 \text{ mA}$ przy napięciu 18 V; szum prądowy na poziomie nie większym niż 100 pA $\sqrt{\text{Hz}}$ przy 1 Hz, gdy prąd nominalny wynosi 10 mA [15]);
- maksymalne uproszczenie konstrukcji w celu zminimalizowania liczebności personelu niezbędnego do obsługi, łatwego zrozumienia działania urządzenia i prostego sposobu powielania wzorca (powodem tych starań jest ułatwienie jego wytwarzania i zastosowania na całym świecie po zatwierdzeniu redefinicji kilograma [16]).

Kluczowymi elementami wagi w wersji NIST-4 są:

- jednorodny, jednoczęściowy, trójpalczasty aluminiowy „pająk” (spider), który został rotacyjnie oddzielony od drugiej strony wagi poprzez diamentowo szlifowane (diamond-turned) aluminiowe koło równoważące;
- koło równoważące o średnicy 609,6 mm (w wersji poprzedniej o nazwie NIST-3 koło to miało średnicę 610 mm), które wykonuje ruchy wahadłowe na krawędzi noża z węgliku wolframu, połączonego z elementem o nazwie Extremely Large Flexure (ELF), wykonanym z odpowiedniego materiału konstrukcyjnego; element ten jest jednorodny i zapewnia precyzyjny ruch postępowy w kierunkach X-Y, który jest niezbędny do dokładnego pozycjonowania cewki wewnątrz magnesu, natomiast środek masy koła jest ustawiony tak, aby znajdował się dokładnie pod krawędzią noża; nominalna prędkość liniowa cewki ruchomej to $975 \mu\text{m/s}$, na drodze 78 mm [17];
- główne strzemie, które jest zawieszone do środkowego punktu „pajaka”, obraca się niezależnie od zespołu pajaka i cewki – służy jako platforma do załadunku i rozładunku masy głównej i pomocniczej w obu trybach pracy;
- cewka miedziana z 928 zwojami o średnicy 0,435 m, która jest podwieszona na trzech identycznych sparowanych systemach „zagięć” (flexures) X-Y; cewka ta jest zawieszona w szczelinie powietrznej

o szerokości 30 mm i ma możliwość przesunięcia w pionie o ± 40 mm od pozycji ważenia wewnątrz magnesu;

- symetryczny w płaszczyźnie góra-dół magnes stały wraz z jarzmem, które umożliwia działanie magnesu w stanie „otwartym” i „zamkniętym”; dzięki symetrii magnesu gradient składowej radialnej pola magnetycznego zanika w płaszczyźnie symetrii. Wartość iloczynu indukcji magnesu i długości cewki równa $700 \text{ T} \cdot \text{m}$ została dobrana tak, aby minimalizować niepewność pomiaru. Więcej szczegółów dotyczących magnesu, w tym pełny opis jego konstrukcji (również opcji z magnesem nadprzewodzącym), można znaleźć w [18].

Cewka ruchoma w NIST-3 miała średnicę 70 cm i około 2400 zwojów, co powodowało, że jej masa wynosiła aż ok. 23 kg. Wersja NIST-4 ma cewkę o średnicy 43,5 cm i 928 zwojów (czyli około 1,4 km drutu), co znacząco zmniejsza jej masę. Zmniejszone gabaryty nowej cewki wymagają umieszczenia jej relatywnie dużej wartości indukcji pola (powyżej 0,5 T), co obecnie można łatwo osiągnąć dzięki nowoczesnym materiałom z magnesami trwałymi, takim jak Sm-Co lub Nd-Fe-B.

Jakość nowego wzorca masy w postaci wagi Kibble’a testuje się kładąc na niej dotychczasowe wzorce masy i wyznaczając wartości stałych Plancka h , które wynikają z zasady działania wagi oraz ze specyfiki kwantowych wzorców napięcia i rezystancji. Oficjalnie Amerykanie uzyskali, jak do tej pory, następujące wyniki pomiarów wartości stałej Plancka dla poszczególnych wersji wagi Kibble’a [17, 19]:

$$1) \quad h_{\text{NIST-2}} = 6,626\,068\,91 (58) \times 10^{-34} \text{ J s}$$

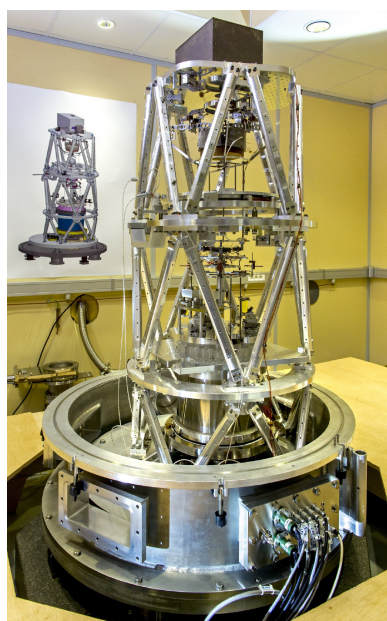
$$2) \quad h_{\text{NIST-3}} = 6,626\,069\,36 (37) \times 10^{-34} \text{ J s}$$

$$3) \quad h_{\text{NIST-4}} = 6,626\,069\,934 (89) \times 10^{-34} \text{ J s}$$

Ostatni wynik, uzyskany za pomocą NIST-4, oparty jest na ponad 10 000 ważeniach mas o wartościach nominalnych od 0,5 kg do 2 kg wykonanych w ciągu dwóch lat, dzięki czemu jego względna niepewność standardowa to $13,5 \cdot 10^{-9}$. Oznacza to, że spełnia on wymogi narzucone przez Międzynarodowy Komitet Miar, a które uznano za niezbędne do przyjęcia redefinicji kilograma. Autorzy tego wyniku szacują, że po redefinicji niepewność względna pomiaru masy z użyciem ich sprzętu, wykonanego ze znacznie mniejszą ilością powtórzeń (równą typowej dla pomiarów w laboratoriach akredytowanych), będzie wynosić nie więcej niż $25 \cdot 10^{-9}$. Pełny budżet niepewności wyniku uzyskanego przez NIST-4 można znaleźć w [17].

Projekt BIPM (międzynarodowy)

Ze względu na szczególną rolę oddziaływania na światową metrologię Międzynarodowego Biura Miar (BIPM) w Sèvres pod Paryżem (Bureau International des Poids et Mesures) powstający tam projekt wagi Kibble’a jest niezmiernie ważnym punktem odniesienia w stosunku do pozostałych projektów. W odróżnieniu od projektu amerykańskiego BIPM zdecydował się na osiową, jednoramienną geometrię wagi Kibble’a, co upraszcza konstrukcję, ale generuje problemy z mechanicznym zrównoważeniem układu. Wybrana geometria ułatwia opcjonalne umieszczenie wagi w komorze próżniowej (rys. 2).



Rys. 2. Ogólny widok na wagę Kibble’a skonstruowaną w BIPM.
Zdjęcie ze strony internetowej BIPM
<https://www.bipm.org/en/bipm/mass/watt-balance/>

Konstruktorzy z BIPM informują ponadto o innowacyjnej koncepcji projektu, polegającej na symultanicznym realizowaniu obu trybów działania wagi [20], jednak szczegóły tego rozwiązania nie zostały podane w kompletnej formie. Zasygnalizowano przy tym, że obydwie, alternatywne koncepcje wagi Kibble’a (dwufazowa i symultaniczna) mają swoje specyficzne ograniczenia, a wciąż trwające porównywanie budżetów niepewności może przynieść jeszcze różne nieoczekiwane rozstrzygnięcia. Niewątpliwie godnymi uwagi są materiały internetowe na stronie BIPM, które ukazują detale, dotyczące projektu zoptymalizowanego obwodu magnetycznego, dedykowanego wadze Kibble’a [20, 21]. Dzięki zastosowaniu dwóch wysokiej klasy magnesów samarowo-kobaltowych w kształcie dysków oraz jarzma z miękkiego magnetycznie stopu Fe-Ni (zamiast stali) osiągnięto dużą jednorodność radialną pola magnetycznego w szczelinie (rzędu 10^{-4} na długości

ok. 40 mm), jego relatywnie wysoką wartość (rzędu 0,5 T), jak również stabilność termiczną oraz odporność na pola zewnętrzne (dzięki ekranowaniu). W opublikowanych niedawno artykułach [22, 23] częściowo wyjaśnia się kwestia, czym w praktyce może być wzmiankowany uprzednio symultaniczny cykl pracy. Otóż w rzeczywistości waga pracuje w dwóch trybach pomiarowych osobno, tylko że przez cewkę płynie prąd o tej samej wartości. Dzięki temu w obydwu przypadkach wpływ pola magnetycznego, pochodzącego od prądu cewki, na obwód magnetyczny, jest taki sam, co znacząco wpływa na dokładność pomiaru. Inną cechą wyróżniającą ten projekt jest zastosowanie siłowników elektrostatycznych do poruszania cewką. Dzięki temu uzyskano nie tylko wyjątkową precyzję ruchu cewki, ale również wyeliminowano wpływ pól magnetycznych, które wytwarzane są przez konwencjonalne silniki cewkowe. Również w przypadku układu optycznego do śledzenia położenia i prędkości cewki zdecydowano się na zastosowanie najbardziej zaawansowanych technicznie interferometrów laserowych.

Projekt UME (turecki)

Krajowy Instytut Metrologiczny w Turcji (National Metrology Institute / Ulusal Metroloji Enstitüsü, UME) zastosował specyficzne, innowacyjne podejście do projektu wagi Kibble’a. System kompensacji siły składa się z pełnozakresowej wagi Mettler Toledo PR 10003 oraz szalki zaprojektowanej tak, by wkładać wzorce odniesienia [24]. Do wagi przymocowana jest nieruchoma cewka umieszczona w polu magnetycznym. Cewka połączona jest z ramą wspornika za pomocą trzech niemagnetycznych pręcików, które są rozmieszczone w jednakowych odległościach dookoła karkasu cewki.

W przedstawionych poprzednio projektach wag Kibble’a z ruchomym elementem była cewka, natomiast w tej wersji jest nią magnes, a ściślej obwód magnetyczny z magnesami stałymi. Jest to zoptymalizowany obwód magnetyczny typu zamkniętego, promieniście symetryczny. Zaprezentowana w publikacji [25] konfiguracja obwodu jest analogiczna do tej, zastosowanej w projekcie amerykańskim NIST-4, z jedną znaczną różnicą – wymiary we wszystkich kierunkach przestrzennych zostały zredukowane 3-krotnie. Przeskalowanie geometrii obwodu zostało zrealizowane w taki sposób, żeby zachować w obwodzie z projektu UME takie same wartości pól magnetycznych, jak w obwodzie z projektu amerykańskiego NIST-4, który wytwarza radialne pole magnetyczne o indukcji $B = 0,55 \text{ T}$ w środku szczeliny powietrznej. Geometria wagi Kibble’a w projekcie UME ma liczne zalety, ponieważ jedynym elementem ruchomym jest obwód magnetyczny sprzężony z siłownikiem. Na obecnym etapie rozwoju

projektu UME waga Kibble’a przystosowana jest do realizacji wzorca 0,1 kg.

Projekt NPL (brytyjski)

Już w pierwszych latach XXI wieku w National Physical Laboratory (NPL) w Wielkiej Brytanii rozpoczęło pracę nad wagą Kibble’a w ramach projektu Mark II. Waga ta charakteryzowała się bardzo solidną, wielkobarytową konstrukcją w konfiguracji dwuramiennej i została wyposażona w komorę próżniową [26]. W 2009 roku NPL podjął decyzję o przekazaniu swojej wagi Mark II do kanadyjskiego National Research Council – Institute for National Measurement Standards (NRC-INMS) w Ottawie. Dzięki temu nowy, niezależny zespół naukowców i inżynierów mógł przejąć rozpoczęty projekt i realizować go, wnosząc dodatkowe metody oraz rozwiązania techniczne, które mają zapewnić pożądany poziom powtarzalności i odtwarzalności wzorca 1 kg.

W ostatnich latach zarząd NPL zdecydował się na całkowitą zmianę strategii projektowej, dotyczącej wagi Kibble’a. Inspiracją stała się praca [8] opublikowana w roku 2014, której współautorem był Bryan Kibble. Jej tytuł “Principles of a new generation of simplified and accurate watt balances”, w pełni oddaje istotę nowego podejścia. Przewiduje ono maksymalne uproszczenie konstrukcji, obniżenie kosztów wytwarzania oraz komercjalizację wagi Kibble’a, jako produktu handlowego. Do niedawna szczegóły techniczne projektu nie były publicznie ujawniane. Jednak wiosną 2018 roku projekt został zaprezentowany oficjalnej delegacji GUM wizytującej NPL. Ponadto, w tym samym czasie NPL przedstawił swój projekt na Międzynarodowej Konferencji Metrologicznej i wystawie Euspen 2018 w Wenecji. Dzięki uczestnictwu w tej konferencji pracowników Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu, możliwe było uzyskanie szczegółowego opisu demonstracyjnej wersji kompaktowej wagi Kibble’a z NPL w materiałach konferencyjnych [27]. Całkowita wysokość wagi wynosi ok. 45 cm, a jej głównego mechanizmu – 30 cm. Waga pracuje w konfiguracji pionowej, ma geometrię osiową i nie wymaga użycia komory próżniowej. Zastosowanie cewek ze zdwojonym uzwojeniem (bi-filar winding) pozwoliło na prawie jednoczesny pomiar prądu równoważenia i napięcia indukcji w fazie ruchu pomiarowego (single-mode, dual-phase). Najprawdopodobniej, to rozwiązanie pozwoliło również na uniknięcie konieczności zastosowania dodatkowego komparatora masy do wstępnej tarowania (równoważenia) masy ruchomego mechanizmu pionowego. Ponadto stabilność jego ruchu, a zwłaszcza wyeliminowanie poziomej składowej prędkości, uzyskano optymalizując konstrukcję sprężynowych

przewodnic planarnych (flexure strips) metodą elementów skończonych.

Na obecnym etapie rozwoju miniaturowej wersji wagi Kibble'a z NPL typowy zakres komparacji masy to (100–200) g. Jednym z powodów braku możliwości komparacji pełnego kilograma było zastosowanie, konieczne z powodów konstrukcyjnych, lekkiego tworzywa sztucznego typu PEEK (polieteroeteroketon) do wykonania uchwytu na odważniki. Dzięki temu układ został znacząco odciążony oraz zmniejszona została jego efektywna podatność magnetyczna, ale użyty materiał okazuje się zbyt miękki, by móc dostatecznie precyzyjnie określać położenie mechanizmu pionowego. Zgodnie z wcześniejszymi zapewnieniami zespołu NPL, który pracuje nad projektem, w nieodległej przyszłości (około roku 2020) będzie jednak możliwe „przeskalowanie” konstrukcji zarówno na obszar większych mas (w tym 1 kg), jak i zakres mikro-mas i mikro-sił [28]. Zapewnienia te nie zostały jednak potwierdzone podczas ostatnich wizyt roboczych przedstawicieli polskiego środowiska metrologicznego w NPL. Ponadto podczas historycznej konferencji CGPM 2018 w Wersalu (Conférence Générale des Poids et Mesures), redefiniującej układ SI, została zaprezentowana kolejna wersja wagi Kibble'a z NPL, jeszcze bardziej kompaktowa niż poprzednie. Nie znane są jednak jej parametry, a zwłaszcza budżet niepewności i zakres pomiaru masy. Nie wiadomo też, czy docelowe parametry waga osiągać będzie w powietrzu czy w próżni. Nie jest też pewne, czy w ogóle do tego modelu wagi będzie można dorobić komorę próżniową oraz w jakim stopniu NPL będzie skłonny udostępniać technologiczny know-how i udzielać zgodę na działania komercjalizacyjne.

Projekt LNE (francuski)

Francuski Krajowy Instytut Metrologiczny LNE (Laboratoire National de Métrologie et d'Essais) w Trappes pod Paryżem realizuje swój własny projekt wagi Kibble'a na potrzeby francuskiej metrologii masy. Koncepcja konstrukcyjna urządzenia bardzo przypomina projekt z BIPM, więc nie będą tu przytaczane szczegółowe opisy, zdjęcia i schematy – dostępne m.in. w [28, 29]. Warto jednak podkreślić kilka cech charakterystycznych tego projektu. Otóż w celu wstępnego wytarowania ciężaru zawieszenia wagi stosuje się prostą, mechaniczną belkę dwustronną i odpowiednią „przeciwmasę” – zamiast układu z próżniowym komparatorem masy (jak w BIPM). W drugim trybie pomiarowym usztywnia się belkę, która tym samym staje się jedną całością układu wykonującego ruch wahadłowy wraz z cewką. Konstrukcja została zoptymalizowana na zakres ważenia 0,5 kg, co nie stanowi istotnego problemu, gdyż jest to wciąż oczekiwany rząd wielkości. Ze względu na wciąż trwające prace, które mają

zapewnić tej wadze prawidłowe funkcjonowanie w próżni, do tej pory przeprowadzono w LNE pomiary jedynie w powietrzu w warunkach stałego ciśnienia, osiągając rekordowo małe niepewności [28]. Jednakże realizacja tego eksperymentu w komorze stałociśnieniowej wymagała użycia niezmiernie precyzyjnych i drogich przyrządów do monitorowania parametrów gazu (temperatury, ciśnienia, wilgotności itp.), które zapewniały stabilną pracę interferometru mierzącego położenie i prędkość cewki.

Wizyty robocze, które odbył jeden z autorów niniejszego opracowania (T. Szumiata), zarówno w BIPM, jak i w LNE (kilka dni po zakończeniu 26. CGPM) pozwoliły ustalić wiele istotnych szczegółów technicznych dotyczących różnych aspektów działania wag Kibble'a w obydwu ośrodkach. Niektóre z przytoczonych wniosków i informacji częściowo weryfikują wiedzę dostępną w literaturze i przedstawioną w niniejszym artykule, zwłaszcza w odniesieniu do projektu z BIPM.

- Wspomniano wcześniej, że w wadze BIPM stosowany był dotychczas siłownik elektrostatyczny, który dzięki braku pola magnetycznego miał być neutralny dla mechanizmu ważącego. Niestety okazało się, że jest on zbyt słaby, za bardzo nieliniowy i niewygodny ze względu na konieczność sterowania wysokim napięciem. Wobec tego zarówno w BIPM, jak i w LNE wagi Kibble'a są obecnie przystosowywane do pracy z elektromagnetycznymi silnikami krokowymi lub liniowymi.
- Pozyskano wiedzę, że do prawidłowego i wygodnego funkcjonowania wagi Kibble'a potrzebny jest osobny, dedykowany (np. z NIST) wzorzec kwantowy napięcia elektrycznego (oparty na matrycy złącz Josephsona w kriostacie z ciekłym helem). Do obwodu prądowego nie stosuje się jednak osobnego wzorca kwantowego oporu elektrycznego (opartego na kwantowym efekcie Halla), ze względu na konieczność stosowania niższych temperatur od ciekłego helu i bardzo silnych pól magnetycznych z magnesów nadprzewodzących. Silne pola magnetyczne są trudne do długiego utrzymywania i mają niekorzystny wpływ na funkcjonowanie samej wagi Kibble'a. W tym przypadku lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie opornika wzorcowego, utrzymanego w komorze klimatyzowanej. Oczywiście potrzebne jest dedykowane, wysokostabilne źródło prądowe (np. z NIST) i drugi, kwantowo-kriogeniczny wzorzec napięcia do pomiaru różnicy potencjału na oporniku. Należy podkreślić, że wystarczająco stabilną częstotliwość odniesienia dla mierników częstotliwości przy złączach Josephsona oferuje składowa 10 MHz ze standardowego sygnału GPS.
- W wadze Kibble'a z BIPM stosuje się tzw. równoległy tryb pracy, tzn. pomiaru napięcia indukcji dokonuje



się przy płynącym prądzie cewki o wartości takiej samej w obu fazach pomiarowych. Dzięki temu wpływ pola magnetycznego od cewki na obwód magnetyczny z magnesami stałymi jest taki sam. Trudnością w tym przypadku jest jednak precyzyjne odróżnienie napięcia na oporze omowym cewki od napięcia indukcji. Z tego względu w projekcie z LNE zrezygnowano z takiego rozwiązania technicznego.

- Pomiar, teoretycznie stałego, napięcia indukcji wymaga jednak odseparowania składowej zmiennej, wynikającej z niejednorodności składowej radialnej pola magnetycznego i niejednostajności ruchu cewki. Wykorzystuje się do tego celu precyzyjny woltomierz AC.
- Ze względu na dużą stabilność temperatury w komorze próżniowej wagi Kibble'a w obwodach magnetycznych wystarczy zastosować standardowe magnesy Sm-Co bez dodatku Gd lub innych ziem rzadkich (zapewniających lepszą stabilność temperaturową remanencji dzięki współzawodnictwu oddziaływań ferromagnetycznych i antyferromagnetycznych). Nie ma też konieczności stosowania bocznikowania magnetycznego ani dedykowanych, miękkich materiałów magnetycznych o podwyższonej stabilności temperaturowej przenikalności magnetycznej do konstrukcji korpusu obwodu magnetycznego (wystarczy odlewane żelazo lub stop żelaza z niklem).
- Zmniejszenie wpływu drgań zewnętrznych na wagę Kibble'a w BIPM realizuje się poprzez umieszczenie jej na bloku betonowym odizolowanym od spodniej części fundamentu warstwą piasku. Rozwiązanie to może w przyszłości okazać się niewystarczające ze względu na planowaną budowę linii metra pod wzgórzem Sèvres. W LNE-Trappes zbudowano osobny, odizolowany fundament dla wagi Kibble'a w postaci płyty z czterema filarami o długości 12 m. System potrójnych ścian („pomieszczenia w pomieszczeniach”) oraz nieturbulentny przepływ powietrza w rurach klimatyzacyjnych o bardzo dużej średnicy redukują drgania przedostające się przez środowisko gazowe. Fundament i pozostałe rozwiązania antywibracyjne w LNE-Trappes potwierdzają swoją skuteczność poprzez fakt, że nie obserwuje się istotnego wpływu ruchliwej ulicy i linii kolejowej, znajdującej się stosunkowo blisko.
- Nieodzowność pomiaru dokładnej wartości (jak i niejednorodności przestrzennej oraz ewolucji czasowej) przyspieszenia ziemskiego w pobliżu wagi Kibble'a w BIPM zapewnia grawimetria realizowana przez podmioty zewnętrzne. Grawimetr ustawiany jest w sąsiednim pomieszczeniu, niestety z konieczności na bloku betonowym o mniejszych gabarytach niż ten pod wagą Kibble'a. W przypadku LNE jest to

dokładnie bliźniacze pomieszczenie z identycznym fundamentem, na którym cały czas spoczywa bezwzględny grawimetr nowej generacji oparty na spadku swobodnym zimnych atomów. Do pomiaru gradientów pola grawitacyjnego stosuje się ultraczułe, względne grawimetry nadprzewodnikowe. W celu uzyskania dostatecznej precyzji pomiarów uwzględnia się poprawki pływowe zależne od czasu oraz „samoprzyciąganie” grawitacyjne ciężkich elementów konstrukcji wagi.

- Jak już wspomniano, zarówno w BIPM jak i w LNE, pomiaru prędkości ruchu i położenia cewki dokonuje się metodą interferometrii optycznej o podwyższonej precyzji, przy czym w samej wadze Kibble'a instaluje się jedynie zwierciadełka, natomiast światło doprowadzane jest i odprowadzane światłowodami. Pozostałe elementy interferometru znajdują się w sąsiednim pomieszczeniu. Na uwagę zasługuje zwłaszcza laser Nd:YAG z linią zieloną (druga harmoniczna), którego układ optyczny (m.in. wraz z modulatorami elastoptycznymi i mieszaczem heterodynowym do interferometru) jest dedykowaną konstrukcją wieloelementową na osobnym stole optycznym. W celu kontroli ruchu w trzech kierunkach stosuje się trzy tory interferometryczne.
- Jednorodność odczuwanej przez cewkę radialnej składowej pola magnetycznego w szczelinie obwodu magnetycznego wymaga niezmiernie precyzyjnego pozycjonowania osi zawieszenia cewki i osi obwodu magnetycznego (z dokładnością do mikroradianów). Uzyskuje się to poprzez układ laserowy oraz zestaw małych obciążników równoważących.

Projekt PTB (niemiecki), czyli waga Plancka

Bardzo interesującym podejściem do redefinicji wzorców masy jest idea skonstruowania tzw. wagi Plancka wg projektu rozwijanego w ostatnim czasie przez niemiecki instytut metrologiczny PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) oraz Politechnikę w Ilmenau [30–33]. Nowatorska koncepcja polega na wykorzystaniu i zaadaptowaniu istniejącego siłownika elektromagnetycznego z komparatora masy. Mechanizm musi być jedynie uzupełniony o siłownik, który realizował będzie tryb autokalibracji indukcyjnej komparatora (tak, by stał się prawdziwą wagą Kibble'a). Amplituda ruchu musi być niewielka, ponieważ mechanizmy ważące komparatorów i obwodów magnetycznych nie są przystosowane do ruchu cewki daleko od położenia równowagi. Projekt przewiduje budowę szeregu „wag Plancka” na zakresy od 1 mg do 1 kg. Waga Plancka ma pracować w powietrzu, a nie w próżni, tak jak wyjściowy komparator, na bazie którego została wykonana. Powinien on być rozwiązaniem wyjątkowo

ekonomicznym i łatwym do komercjalizacji. Docelowa cena wagi Plancka może być nawet kilkaset razy mniejsza od tradycyjnej wagi Kibble'a dla 1 kg. Redukcja kosztów wynika nie tylko z wykorzystania mechanizmu komercyjnych komparatorów masy, ale również m.in. z braku konieczności stosowania kwantowych, kriogenicznych wzorców wielkości elektrycznych. Wystarczą standardowe wzorce wtórne dobrej klasy (wywzorcowane uprzednio w NMI). Redukcja wymagań technicznych wobec wagi Plancka jest możliwa dlatego, że z samego założenia nie ma być ona wykorzystywana do odtwarzania jednostki masy w krajowych instytutach metrologicznych, a jedynie do wzorcowania odważników (do klasy E1 włącznie). Jest urządzeniem atrakcyjnym dla producentów odważników, jak również dla lokalnych oddziałów krajowych urzędów miar i komercyjnych laboratoriów metrologicznych. Oznacza to także perspektywę dużego popytu na produkt. Cenę wagi Plancka zmniejsza również fakt, że do monitoringu ruchu cewki nie jest potrzebny wysokiej klasy interferometr laserowy, a nawet można sobie wyobrazić konstrukcję bez interferometru, tylko z indukcyjnym sprzężeniem zwrotnym (jak np. w standardowych wibratorach używanych w spektrometrii efektu Mössbauera). Przy założonym poziomie dokładności nie jest też konieczne posiadanie grawimetru. W zasadzie wystarczy jednorazowe wyznaczenie wartości lokalnej g w laboratorium.

Projekt polski – założenia

W przypadku podjęcia strategicznej decyzji o realizacji polskiego projektu wagi Kibble'a stanie się konieczne podjęcie wielu decyzji szczegółowych, określających założenia realizacji tego projektu. Będą to kwestie dotyczące wyboru koncepcji technicznej, docelowej lokalizacji laboratorium masy, kosztorysu, harmonogramu roboczego oraz działań perspektywicznych.

Wybór koncepcji

Przegląd już realizowanych projektów wag Kibble'a w wiodących instytutach metrologicznych na świecie pokazuje różnorodność wariantów koncepcyjnych realizacji wag Kibble'a praktycznie w każdym aspekcie konstrukcyjnym (mechanicznym, geometrycznym, elektromagnetycznym, optycznym). Przystępując do projektu polskiego będzie trzeba rozstrzygnąć m.in. czy konstrukcja wagi powinna być dwuramienna, czy jednoramienna (osiowa). Wnioski wynikające z porównania koncepcji amerykańskiej i francuskiej nie są jednoznaczne. Amerykańska konstrukcja dwuramienna jest łatwa do wstępnego zrównoważenia mechanicznego dzięki dwuramienności realizowanej poprzez mechanizm kołowy

i dzięki przeciwmacie. W przypadku projektu francuskiego i tureckiego zasadniczy mechanizm ma jednoramienną geometrię osiową, co uniemożliwia bezpośrednią kompensację masy części ruchomej wagi. W tym przypadku kompensacja jest realizowana poprzez sprzężenie wagi Kibble'a z komparatorem masy. Jednakże geometria osiowa ma swoje zalety, ponieważ upraszcza konstrukcję i ułatwia pionizację. Ten argument można uznać za przesądający przy wyborze koncepcji. Godną rozpatrzenia jest wspomniana już francuska koncepcja symultanicznej pracy wagi Kibble'a. Należy zwłaszcza zastanowić się, czy przepuszczanie prądu przez cewkę faktycznie poprawi dokładność wzorcowania, bo choć prowadzi to do kompensacji efektów oddziaływania pola cewki na obwód magnetyczny, to jednocześnie utrudnia pomiar napięcia indukcji elektromagnetycznej. Kolejna kwestia to górna granica zakresu wzorców masy. Warto podkreślić, że projekt turecki obecnie obejmuje wyłącznie realizację wzorca 100 g. Nie jest to akceptowalna perspektywa docelowa, przy czym wariant ten może być potraktowany jako etap wstępny (przejściowy) w ramach polskiego projektu wagi Kibble'a, która powinna realizować finalnie wzorec pełnego kilograma. Należy również wziąć pod rozwagę pewne szczególne rozwiązanie zaproponowane w projekcie tureckim. Otóż, jak już wspomniano w opisie tego projektu, w przeciwieństwie do wszystkich innych konstrukcji wag Kibble'a, w tym przypadku zrezygnowano z ruchomej cewki na rzecz ruchomego magnesu stałego (obwodu magnetycznego z magnesem stałym). Dzięki temu posunięciu masa części ruchomych zmniejszyła się, co pozwoliło znacząco zwiększyć prędkość ruchu cewki. W praktyce oznacza to większe napięcie indukcji i bardziej precyzyjny pomiar. Wydaje się jednak, że w przypadku pełnego zakresu wagi Kibble'a (do 1 kg) masa własna poruszanego obwodu magnetycznego byłaby na tyle duża, że nie dałoby się skorzystać z walorów wspomnianej koncepcji. Ostateczna decyzja o skorzystaniu lub odrzuceniu tej opcji zapadnie w wyniku dalszego rozeznania problemu i konsultacji z partnerami zagranicznymi. Konsultacje te będą dotyczyły również wielu innych kwestii technicznych, takich jak np. rodzaj zawieszania mechanizmu, układu do tłumienia drgań mechanicznych, jak również celowość adaptacji wagi Kibble'a do pracy w próżni. W przypadku doboru interferometrów laserowych, konieczne będzie ustalenie, czy do celów realizacji projektu wystarczy ich standardowa wersja (lekko zmodyfikowana), czy też pojawi się konieczność zastosowania zaawansowanych technicznie interferometrów.

Skrajnie odmiennym podejściem byłoby oparcie się o projekt brytyjskiego NPL (National Physical Laboratory), opisanym we wcześniejszej części niniejszego opracowania. Zgodnie z ofertą przedstawioną ostatnio przez NPL [34] istnieje możliwość zakupu gotowej, miniaturowej



wersji wagi Kibble'a w pakiecie z wielomiesięcznymi stażami szkoleniowymi dla dwóch osób. Koszt takiego rozwiązania wyniósłby około 3 mln złotych i pozornie wyeliminowałby potrzebę realizacji jakiegokolwiek polskiego projektu. Niestety, jak już wspomniano, obecnie w NPL dostępna jest jedynie waga na zakres subkilogramowy (100–200) g i nie ma żadnej pewności, czy w najbliższych latach NPL będzie w stanie zaoferować komercyjną wagę kilogramową oraz że cena będzie zbliżona do wagi subkilogramowej. Niewątpliwie wartościowym posunięciem byłoby odbycie stażu w NPL, podczas którego wnikliwie można by poznać wiele szczegółów technicznych działania wagi Kibble'a (w tym wielu wspólnych dla wszystkich dotychczasowych koncepcji). Niestety wymieniona kwota za staż z wymuszonym zakupem demonstracyjnej wagi może zostać uznana za zbyt wysoką, zwłaszcza, że za kilka lat konieczne byłoby wyasygnowanie zapewne jeszcze większej kwoty na docelową wagę kilogramową i docelowe szkolenie. Nawet gdyby uznać zakres masy (100–200) g za dogodny, to wciąż nie wiadomo, jaki będzie ostateczny budżet niepewności kolejnych, coraz bardziej kompaktowych rozwiązań z NPL i czy zajdzie konieczność eksploataowania oferowanej wagi w komorze próżniowej.

Nie można pomijać argumentów świadczących przeciw realizacji polskiego projektu wagi Kibble'a na cały kilogram (lub zakres do niego zbliżony), ponieważ w tym przypadku wymagania technologiczne są ekstremalnie wysokie. Wiodące ośrodki metrologiczne na świecie zmagają się z tym zagadnieniem od ponad 10 lat i zbudowane do tej pory wagi Kibble'a nie są w stanie działać prawidłowo w sposób ciągły. Ponadto koszty, które pochłonęłyby prace rozwojowe, są trudne do oszacowania, ale mogą sięgać nawet kilkudziesięciu milionów euro. Polska zapewne nie byłaby w stanie wyasygnować takich środków, nie posiada dostatecznie doświadczonej kadry, a poza tym nie może sobie pozwolić na start od zera, mając kilkustoletnie opóźnienie. Dlatego rozsądnym rozwiązaniem jest, z jednej strony korzystanie z wag Kibble'a w wiodących ośrodkach na świecie, a z drugiej strony budowa polskich wag Kibble'a na zakres gramów i miligramów, co zapewniłoby znacznie lepszą dokładność realizacji wzorców. Taką sugestię sformułowało zarówno kierownictwo BIPM w Sèvres jak i LNE w Trappes. Wspomniany projekt najprawdopodobniej dałoby się zrealizować w okresie 5 lat, a jego koszt byłby nieporównywalnie mniejszy niż w przypadku wagi Kibble'a do 1 kg. Mimo to, nie jest to proste zadanie, zwłaszcza, gdy nie posiada się stałego, doświadczonego zespołu ludzkiego, który mógłby zajmować się wyłącznie tym problemem. Z tego też powodu nawet LNE przy realizacji swojego projektu będzie korzystało z kontaktów międzynarodowych, m.in. z NIST, w którym prowadzone są już zaawansowane prace

nad wagą Kibble'a dla małych mas. Dzięki wizycie przedstawiciela NIST z oddziału w Boulder (USA) w GUM, w październiku 2018 r. (w ramach spotkania Komitetu Technicznego Wielkości Elektrycznych), współautor artykułu, Tadeusz Szumiata, nawiązał robocze kontakty z oddziałem NIST w Gaithersburgu, gdzie mieści się amerykańska waga Kibble'a NIST-4 do realizacji 1 kg oraz tworzony jest zespół, który obecnie koordynować będzie prace nad wagami na mniejsze zakresy. Godną uwagi jest perspektywa wzajemnej wymiany doktorantów i doktorów między francuskim LNE a GUM. Ze strony LNE padła obecnie propozycja, żeby Polska włączyła się do wspólnego projektu małych wag Kibble'a na zasadzie oddelegowania np. 2–3 doktorantów lub młodych stażem doktorów z wiodących polskich uczelni. Stypendia powinna zapewnić strona Polska, natomiast strona francuska zapewni dostęp do wiedzy i doświadczenia, które Polska będzie mogła wykorzystać na swoim gruncie. Oznacza to przyzwolenie na budowę podobnych rozwiązań w Polsce oraz na korzystanie z urządzeń francuskich do celów wzorcowań. Główny Urząd Miar koordynowałby konkursową procedurę wstępnej rekrutacji doktorantów i doktorów, natomiast docelową grupę (najprawdopodobniej 3 osób) wyłoniłaby strona francuska. Wybrane osoby byłyby niezmiennie związane ze swoimi macierzystymi uczelniami w Polsce, natomiast badania wykonywałyby w LNE. Szacunkowe koszty czteroletnich stypendiów dla takiej grupy wyniosłby ok. 1,5 mln złotych. W pozyskiwaniu środków na stypendia aktywną rolę odgrywałyby GUM. Finanse mogłyby pochodzić z rozszerzonego budżetu Urzędu, ale przede wszystkim z programów rządowych i unijnych (np.: Marie Skłodowska-Curie Individual Fellowships oraz Marie Skłodowska-Curie Research and Innovation Staff Exchange).

Lokalizacja

Z pozoru oczywistą kwestią jest zlokalizowanie przyszłego układu polskiej wagi Kibble'a w Samodzielnym Laboratorium Masy GUM. Jednakże „środek ciężkości” metrologicznej realizacji nowego wzorca kilograma przesuwają się w kierunku laboratoriów wzorców wielkości elektromagnetycznych. W przypadku GUM jest to Samodzielne Laboratorium Elektryczności i Magnetyzmu z pracownią kwantowych wzorców wielkości elektrycznych. Poza tym funkcjonowanie wagi Kibble'a wymaga precyzyjnych pomiarów optycznych (interferometria) i grawimetrycznych. A zatem, nie tyle formalna lokalizacja laboratorium z nowym wzorcem kilograma jest najważniejsza, a harmonijna współpraca między poszczególnymi jednostkami. Niewątpliwie jednak wybór fizycznego miejsca, w którym ma pracować waga Kibble'a, powinien być trafny i przemyślany. Zwłaszcza istotna jest izolacja

od drgań mechanicznych i zakłóceń elektromagnetycznych oraz stabilność grawimetryczno-tektoniczna. Tym wymogom wyszła naprzeciw decyzja o przeniesieniu większości laboratoriów Urzędu do kampusu świętokrzyskiego. Podczas sesji Rady Miejskiej w Kielcach radni przegłosowali przekazanie gruntu na rzecz Skarbu Państwa, w drodze darowizny nieruchomości gruntowych położonych w Kielcach na powierzchni 11 hektarów, z przeznaczeniem na potrzeby Kampusu Laboratoryjnego Głównego Urzędu Miar. Po dokonaniu odwiertów geologicznych zostanie wskazane dokładne położenie poszczególnych budynków i laboratoriów. Generalnie umiejscowienie nowego kampusu u podnóża Gór Świętokrzyskich należy uznać za bardzo trafną koncepcję nie tylko ze względu na korzystne warunki geologiczne, ale i na realizację priorytetów polityki zrównoważonego rozwoju regionalnego. Warto podkreślić, że rektorzy Politechniki Świętokrzyskiej i Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach podpisali umowę o współpracy z GUM, przy czym Politechnika planuje uruchomienie nowych specjalizacji, związanych z metrologią. Obydwie uczelnie będą stanowić naturalne źródło pozyskania przyszłych kadr dla Kampusu. Należy podkreślić, że zostały wdrożone bardzo rygorystyczne procedury konkursowe, w celu zapewnienia wyboru najlepszego projektu kampusu laboratoryjnego, tak pod względem architektonicznym, jak i funkcjonalnym (technicznym). Propozycję pomocy w projektowaniu i wykonawstwie pomieszczeń labora-

toryjnych, specjalistycznych instalacji klimatyzacyjnych oraz zabezpieczeń antywibracyjnych złożyło ostatnio francuskie LNE.

Harmonogram działań

Tabela 1 przedstawia przykładowy harmonogram przewidywanych działań, związanych z realizacją polskiego projektu kompaktowej wagi Kibble'a na zakres subkilogramowy (gramowy lub miligramowy) w okresie 5 lat od momentu rozpoczęcia przedsięwzięcia.

Zadania perspektywiczne

Wymienione w harmonogramie działania to trzon zasadniczego projektu kompaktowej, subkilogramowej wagi Kibble'a. Złożoność materii merytorycznej i organizacyjnej przy konstruowaniu wagi Kibble'a jest tak znacząca, że zapewne pojawią się jeszcze dodatkowe potrzeby działań uzupełniających lub nawet korygujących przyjętą wcześniej strategię. Tak dzieje się i w największych, najbardziej zaawansowanych ośrodkach metrologicznych na świecie, a np. w amerykańskim NIST kilka zespołów pracuje niezależnie nad kilkoma alternatywnymi koncepcjami, choć jedna z nich ma status wiodącej. Konieczność bieżącej weryfikacji słuszności obranej strategii i modyfikacji niektórych założeń technicznych może powodować wydłużenie czasu realizacji projektu.

Tab. 1. Harmonogram przewidywanych działań

Lp.	Zadanie	Okres (lata)
1	Konsultacje z wiodącymi ośrodkami metrologicznymi, realizującymi projekty kompaktowych wag Kibble'a (LNE, NIST) i kontakt z oddelegowanymi doktorantami	0–2
2	Wybór koncepcji konstrukcyjnej wagi Kibble'a (m.in. wg sugestii doktorantów oddelegowanych do LNE i NIST) i powołanie w GUM stałego zespołu wykonawczo-koordynacyjnego w liczbie ok. 3 osób	1–2
3	Adaptacja tymczasowego pomieszczenia w budynku GUM w Warszawie, na potrzeby układu wagi Kibble'a	0–1
4	Lokalizacja i budowa docelowej bazy lokalowej w kampusie świętokrzyskim	0–5
5	Zaprojektowanie głównego szkieletu konstrukcji, zawieszenia i układu do tłumienia drgań	2–3
6	Zaprojektowanie i wykonanie siłownika elektromagnetycznego wagi Kibble'a i sprzężenie go z komparatorem masy	2–3
7	Zaprojektowanie i skonstruowanie napędu do poruszania cewki	2–3
8	Zaprojektowanie i wykonanie dedykowanych interferometrów laserowych do pomiaru prędkości	2–3
9	Zorganizowanie laboratorium grawimetrii (z optycznym grawimetrem bezwzględny z grzebieniem częstotliwości)	3–4
10	Uzupełnienie zasobów laboratorium z kwantowymi wzorcami wielkości elektrycznych o wtórne wzorce wielkości elektrycznych, dedykowane do pracy z wagą Kibble'a	2–3
11	Wstępne testy poszczególnych podzespołów wagi Kibble'a (dołączenie do stałego zespołu w GUM doktorantów z LNE i/lub NIST)	2–3
12	Docelowe testy wagi Kibble'a, porównanie działania z wagami Kibble'a, działającymi na świecie oraz realizacja działań korekcyjno- optymalizacyjnych	4–5

Naturalnym posunięciem wydaje się również wskazanie takich działań, które można (i na pewno warto) zrealizować już po zakończeniu zasadniczego, ok. pięcioletniego projektu. Należą do nich m.in. następujące przedsięwzięcia:

- 1) integracja wagi Kibble'a z komparatorem próżniowym lub ciśnieniowym,
- 2) ustalenie wzorców wtórnych (np. metalowe czy krzemowe),
- 3) aktualizacja budżetu niepewności dla standardowych metod pomiarowych,
- 4) automatyzacja komparacji poprzez zastosowanie zasobnika bębnowego lub zrobotyzowanego podajnika,
- 5) ocena szans komercjalizacji projektu,
- 6) nakreślenie perspektyw ewentualnego przyszłego projektu kilogramowej wagi Kibble'a na podstawie doświadczenia i wiedzy zdobytej przy realizacji projektu subkilogramowej wagi Kibble'a.

Szacunkowy kosztorys

W tabeli 2 zamieszczono oszacowanie kosztów realizacji projektu subkilogramowej wagi Kibble'a. Kosztorys nie uwzględnia kwot stypendiów doktorskich

i podoktorskich we francuskim LNE lub amerykańskim NIST (podanych wcześniej). Nie obejmuje również zakupu osobnych kwantowych wzorców napięcia i oporu elektrycznego, ponieważ najprawdopodobniej w przypadku wagi subkilogramowej wystarczająco dokładne okażą się wzorce wtórne, kalibrowane przy pomocy wzorców kwantowych.

Źródła finansowania

Ze względu na kompleksowość, interdyscyplinarność i dość wysokie koszty projektu właściwą strategią wydaje się poszukiwanie wielu różnych źródeł finansowania. W naturalny sposób projekt wagi Kibble'a łączy się z projektem budowy świętokrzyskiego kampusu laboratoryjnego dla GUM. Dzięki temu w kosztorysie projektu wagi Kibble'a nie uwzględniono kosztów lokalizacji i postawienia budynków, a jedynie koszty adaptacji pomieszczenia, w którym ma znajdować się docelowo ta waga. Warto podkreślić, że Rada Miejska w Kielcach w formie darowizny przekazała nieruchomości gruntowe, położone w Kielcach na powierzchni 11 hektarów, z przeznaczeniem na potrzeby Kampusu Laboratoryjnego Głównego Urzędu Miar. Dalsze kroki wymagają opracowania dokumentacji konkursowej projektu Kampusu, zgodnie

Tab. 2. Koszty realizacji projektu

Lp.	Specyfikacja kolejnych pozycji kosztorysu za okres 5 lat	Szacunkowa kwota brutto (PLN)
1	Adaptacja tymczasowego pomieszczenia na laboratorium z wagą Kibble'a w dotychczasowym budynku GUM	100 000
2	Przygotowanie docelowego pomieszczenia na laboratorium z wagą Kibble'a w kampusie świętokrzyskim	100 000
3	Koszty delegacji krajowych (konsultacje, konferencje)	100 000
4	Koszty delegacji zagranicznych (konsultacje, konferencje)	400 000
5	Koszty pracy zespołu	500 000
6	Usługi zewnętrzne	1 000 000
7	Materiały konstrukcyjne	500 000
8	Komercyjny komparator masy zaadoptowany do wagi Kibble'a	300 000
9	Wtórne wzorce napięcia i prądu	400 000
10	Wysokiej klasy oscyloskop 24-bitowy	200 000
11	Interferometry laserowe × 3	900 000
12	Wieloprocessorowe stacje robocze do symulacji × 2	100 000
13	Laboratoryjny i mobilny osprzęt komputerowy	100 000
14	Stacjonarne licencje komercyjne programów typu CAD, CAS, MES-FEM (mechanika, elektromagnetyzm)	400 000
SUMA:		5 000 000

z wymogami Działania 1.1 Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Świętokrzyskiego na lata 2014–2020, do którego projekt został zakwalifikowany decyzją Urzędu Marszałkowskiego. Projekt polskiej wagi Kibble’a jest dodatkowym przedsięwzięciem, więc wymaga znalezienia komplementarnych, niezależnych źródeł finansowania. Warto jednak raz jeszcze podkreślić, że planowana zbieżność w czasie realizacji obydwu projektów jest niezmiernie korzystnym i oszczędnym rozwiązaniem. Projekt Kampusu to nie tylko budynki i pomieszczenia, ale również nowa baza aparaturowa. Z punktu widzenia polskiego projektu wagi Kibble’a szczególnie istotne są plany powstania nowoczesnego laboratorium grawimetrii. Dzięki temu będzie można ultraprecyzyjnie zmierzyć wartość przyspieszenia ziemskiego w najbliższym otoczeniu wagi Kibble’a. Zorganizowanie takiego laboratorium zostało wpisane do harmonogramu projektu polskiej wagi Kibble’a, ale nie obciąża budżetu tego przedsięwzięcia, ponieważ należy do całościowego projektu Kampusu.

Naturalnym źródłem finansowania polskiego projektu wagi Kibble’a mógłby być grant z NCBiR (Narodowego Centrum Badań i Rozwoju). Oferta konkursów NCBiR szybko się zmienia, co oznacza konieczność ciągłej aktualizacji wiedzy o pojawiających się ścieżkach konkursowych i strumieniach finansowania. Pewną trudnością w aplikowaniu o środki w NCBiR jest fakt, że specyficzne cechy poszczególnych konkursów i rodzaje beneficjentów określane są na poziomie rządowym i odpowiadają przyjętym priorytetom badawczo-rozwojowym. Rozwój nowoczesnej metrologii do tej pory nie był zazwyczaj doceniany, wobec powyższego trudno jest znaleźć w ofercie NCBiR taki konkurs, który byłby optymalny do finansowania i realizowania polskiego projektu wagi Kibble’a. Wobec tego nieodzowną koniecznością wydaje się ubieganie się o dedykowany konkurs celowy, którego beneficjentami byłiby: Główny Urząd Miar, przedsiębiorstwa innowacyjne z branży metrologicznej oraz uczelnie i instytuty badawcze. Dzięki projektowi, w ramach takiego konkursu powinno stać się możliwe korzystanie ze środków europejskich przypisanych do Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój, będącego największym w Unii Europejskiej programem na rzecz rozwoju badań i tworzenia innowacji. Należy mieć przy tym nadzieję, że perspektywa finansowa tego programu, kończąca się w 2020 roku, zostanie przesunięta na dalsze lata. W celu skonkretyzowania reguł i ram konkursu dedykowanego konieczny będzie bezpośredni kontakt GUM z Ministerstwem Przedsiębiorczości i Technologii oraz Ministerstwem Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Biorąc pod uwagę fundamentalność naukowo-techniczną całości zagadnień związanych z konstrukcją wagi Kibble’a (w tym kontekst redefinicyjny całego układu

jednostek miar w układzie SI), adekwatnym podmiotem do sfinansowania przedsięwzięcia wydaje się również NCN (Narodowe Centrum Nauki). W oferowanej palecie konkursów można dość łatwo znaleźć te, które w znacznym stopniu odpowiadają specyfice projektu. Najbardziej adekwatnym typem konkursu wydaje się w tym przypadku OPUS, tj. konkurs na projekty badawcze, w tym finansowanie zakupu lub wytworzenia aparatury naukowo-badawczej, niezbędnej do realizacji tych projektów. Alternatywnym rozwiązaniem może być aplikowanie do konkursu TANGO, który obejmuje projekty zakładające wdrażanie w praktyce gospodarczej i społecznej wyników uzyskanych w rezultacie badań podstawowych. Zarówno w przypadku konkursów OPUS, jak i TANGO, pojawiła się zapowiedź otwarcia przez NCN ich nowych edycji, chociaż nie wskazano na razie żadnego terminu.

Mając na uwadze perspektywę realizacji polskiego projektu wagi Kibble’a, GUM, jako jednostka podległa Ministerstwu Przedsiębiorczości i Technologii, może ubiegać się o zwiększenie budżetu na działalność statutową oraz o fundusze celowe. Wymaga to jednak działań z dużym wyprzedzeniem, ponieważ wspomniane środki muszą być najpierw przewidziane w budżecie centralnym, który uchwała Sejm. Oznacza to konieczność uzyskania odpowiedniego konsensusu i zrozumienia w środowisku polskich parlamentarzystów oraz kręgach rządowych. Nie będzie to możliwe bez prowadzenia odpowiedniej polityki informacyjnej.

Wytyczając strategię finansowania projektu należy również brać pod uwagę możliwość bezpośredniego skorzystania z funduszy i programów międzynarodowych, a zwłaszcza europejskich. Jednym z takich programów jest EMPIR (European Metrology Programme for Innovation and Research), ustanowiony na rzecz innowacji i badań w dziedzinie metrologii przez EURAMET (The European Association of National Metrology Institutes). Decyzją Parlamentu Europejskiego i EURAMET od 2014 roku program EMPIR jest współfinansowany z unijnej perspektywy „Horyzont 2020” oraz przez państwa uczestniczące w programie.

Poszukując źródeł finansowania projektu polskiej wagi Kibble’a należy również zapoznać się z koncepcją i ofertą Europejskiej Rady ds. Innowacji (European Innovation Council – EIC) na lata 2018–2020, sprzężonej z Programem Ramowym Horyzont 2020. Europejska Rada ds. Innowacji (EIC) powstała z inicjatywy Komisji Europejskiej i ma wspierać najbardziej obiecujących europejskich innowatorów w realizowaniu pomysłów o znaczeniu międzynarodowym. Swoją pomocą obejmuje przede wszystkim przedsiębiorców, małe i średnie firmy, duży przemysł oraz naukowców. Zadania Rady są realizowane głównie poprzez instrumenty programu Horyzont 2020, takie jak: SME Instrument, Fast Track to Innovation, FET Open czy



EIC Horizon Prizes. EIC ma do dyspozycji 2,7 miliarda euro na realizację ponad 1000 innowacyjnych projektów. EIC ma także stanowić jeden z filarów nowego programu ramowego po 2020 roku.

W przypadku przygotowywania wniosku grantowego preferowaną okolicznością byłoby stworzenie konsorcjum obejmującego GUM, współpracujące uczelnie i te firmy innowacyjne, które będą bezpośrednio związane z realizacją kluczowych zadań w ramach grantu związanego z polskim projektem wagi Kibble'a. Jednostki nie wchodzące w skład konsorcjum, ale niezbędne przy realizacji projektu, byłyby zaangażowane, jako wykonawcy zewnętrzni projektu. Przy tej okazji warto podkreślić, że wkład polskich firm z sektora zaawansowanych technologii może mieć wymiar nie tylko czysto materialny, ponieważ regułą jest, że dzielą się one znacznie chętniej swoim know-how i poświęcają więcej czasu na realizację nietypowych rozwiązań niż duże korporacje zagraniczne.

Aplikując o fundusze na polski projekt wagi Kibble'a należy liczyć się z możliwymi trudnościami w otrzymaniu pełnej kwoty na jego realizację, szacowanej na ok. 5 mln złotych, z jednego źródła finansowania. Prawdopodobne jest sięganie stopniowo po mniejsze pule środków pieniężnych. W takim przypadku konieczne będzie podzielenie projektu na kilka etapów i sporządzenie dla każdego z nich osobnych harmonogramów i kosztorysów cząstkowych.

Ocena celowości projektu

Alternatywy dla projektu i działania komplementarne

Podstawą krytycznej analizy celowości projektu jest wskazanie alternatywnych rozwiązań i możliwości. I tak, w świetle pierwotnej strategii procesu redefinicji wzorca kilograma zarysowanej przez BIPM, można wyobrazić sobie funkcjonowanie krajowego systemu metrologicznego w dziedzinie masy bez posiadania własnej wagi Kibble'a. Wobec wciąż istniejących kłopotów z odtwarzalnością wyników uzyskiwanych na tych wagach, skonstruowanych w wiodących ośrodkach na świecie oraz wielkiej złożoności technologicznej realizowanych tam już od wielu lat projektów, nie byłoby rozsądne angażowanie się Polski w niezależne budowanie wagi Kibble'a na zakres 1 kg. Główny Urząd Miar będzie mógł, a nawet powinien, przygotowywać się do finalnej redefinicji kilograma, nie realizując własnego projektu wagi Kibble'a, na dowolny zakres masy.

Działania przygotowawcze w Głównym Urzędzie Miar zostały już rozpoczęte. Ich efektem jest m.in. dokonana instalacja komparatora próżniowego z systemem

„load-lock” do umieszczania i porównywania wzorców masy przechowywanych w próżni. Jest to najbardziej profesjonalna procedura realizacji przyszłościowej ścieżki przekazywania jednostki masy pomiędzy ośrodkami dysponującymi wagą Kibble'a a krajowymi instytucjami metrologicznymi w państwach, które nie będą posiadały takich urządzeń. Ścieżka ta zakłada, że kalibracja wzorca masy przy użyciu wagi Kibble'a (np. w BIPM) odbywa się w próżni. Niestety, zarówno w BIPM jak i w LNE, wagi Kibble'a nie dysponują aktualnie systemem „load-lock”, co wymusza napowietrzanie komory próżniowej wagi przy wkładaniu i wyjmowaniu wzorca. Jest prawdopodobne, że w przyszłości sytuacja ta ulegnie zmianie. Silną motywacją powinny być tu wyniki badań [35–38], które jednoznacznie wskazują na to, że każdorazowe napowietrzanie wzorca kilogramowego ze stali lub stopu Pt-Ir oznacza absorpcję dodatkowej masy o wartości rzędu kilkudziesięciu mikrogramów. W przypadku wzorca krzemowego (o znacznie mniejszej gęstości) można spodziewać się odpowiednio większego efektu.

W związku z powyższym, niezależnie od innych działań i programów dotyczących redefinicji kilograma, należałoby już teraz zacząć realizować polski projekt kontenera próżniowego. Obejmowałby on zaprojektowanie przenośnego, poręcznego pojemnika próżniowego do przenoszenia wzorców masy. Masa własna kontenera walizkowego nie powinna być zbyt duża, a jego cechy konstrukcyjne powinny uwzględniać certyfikację bezpieczeństwa w transporcie lotniczym. Pojemnik powinien również zapewniać kompatybilność z systemami „load-lock” komparatora próżniowego w GUM i docelowych wag Kibble'a w wiodących ośrodkach metrologicznych na świecie. Oprócz tego projekt powinien przewidywać zakup po kilka kilogramowych wzorców wtórnych, wykonanych z różnych materiałów (niemagnetyczna stal nierdzewna, stop Pt-Ir, kula krzemowa), jak również małych próbek tych materiałów w postaci płytek i krążków. Dzięki temu można by kontynuować i rozwijać prowadzone już od kilku lat badania w NPL [35–38] nad wpływem transferu próżnia-powietrze-próżnia na masę wzorców, a w szczególności stopień nieodwracalności zmiany masy po wielu cyklach transferu. Warto byłoby nakreślić program badań stanu powierzchni wzorców stalowych przechowywanych w próżni, powietrzu i azocie. W komparatorze próżniowym w GUM badana byłaby zmiana masy. Konieczny też byłby zakup przez GUM pojemników, które zapewniałyby długookresowe przechowywanie wzorców w stabilnych warunkach środowiskowych (skład gazu, ciśnienie, wilgotność, temperatura). W poznaniu zjawisk odpowiedzialnych za zmianę masy wzorców kluczowe byłyby badania składu pierwiastkowego metodą SEM-EDS (energetyczna mikroanaliza rentgenowska w elektronowym mikroskopie skaningowym w środo-

wisku próżniowym). Dodatkową, przydatną metodą badawczą, która pozwoliłaby na detekcję śladowych ilości związków chemicznych na powierzchni wzorców, mogłaby okazać się spektroskopia fotoelektronów emitowanych pod wpływem promieniowania rentgenowskiego (XPS). W tej metodzie badane próbki materiałów również znajdują się w próżni. W przypadku wzorców stalowych, które zawierają żelazo, dałoby się też zastosować najbardziej czułą metodę do określania związków chemicznych i faz krystalicznych z Fe na powierzchniach próbek, jaką jest spektroskopia mössbauerowska elektronów konwersji CEMS. Pewnym ograniczeniem tej metody jest długi czas pomiaru (2–3 dni) i niepróżniowa atmosfera w detektorze ($\text{He} + 4\% \text{CH}_4$) oraz konieczność zmiany próbek w powietrzu. W związku z tym metoda nie nadaje się do badania efektów krótkotrwałego napowietrzania, lecz do analizowania wpływu przechowywania w określonych warunkach przez okres około miesiąca lub dłużej. Wymienione metody badawcze są profesjonalnie rozwijane i stosowane w dwóch radomskich ośrodkach badawczych, tj. w Instytucie Technologii Eksploatacji w Radomiu oraz w Katedrze Fizyki na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu. Bardzo korzystnym rozwiązaniem byłoby wspólne opracowanie konsorcjalnego wniosku o grant na badania dotyczące wyżej opisanej tematyki. Szacunkowy koszt takiego projektu mógłby wynieść ok. 1–2 mln złotych. Podobny budżet konieczny byłby do realizacji wspomnianego projektu pojemnika próżniowego, przy czym w jego szacowaniu zawsze należy uwzględniać istotne koszty delegacji związanych z komparacją wielu wzorców krajowych ze wzorcami międzynarodowymi (z nowymi i z dotychczasowymi).

Jeszcze innym pomysłem na włączenie się Polski w działania związane z redefinicją kilograma jest omówiona już w pierwszej części opracowania idea konstrukcji tzw. wagi Plancka. Ze względu na fakt, że konstrukcja tego urządzenia bazuje na siłowniku do komercyjnego komparatora masy, jego koszty są relatywnie niskie i stosunkowo łatwe do oszacowania. Poza tym jest to rozwiązanie, które najłatwiej można skomercjalizować. Oryginalnie waga Plancka to koncepcja niemiecka (PTB, Politechnika w Ilmenau), ale ze względu na brak opatentowania samej idei, możliwa byłaby realizacja tego projektu przez polskie firmy. Projekt miałby charakter rozwojowo-wdrożeniowy i finalnie powinien przynieść pozytywny rezultat komercjalizacyjny. Mogłyby w nim uczestniczyć też uczelnie wymienione w dalszej części opracowania. Warto dodać, że np. na Wydziale Mechanicznym UTH Radom realizowane są już prace doktorskie tematycznie powiązane z zagadnieniem dotyczącym wagi Plancka (jak również nad nowymi wzorcami małych mas). Przed rozpoczęciem projektu należałoby

jednak wykonać bardzo staranną analizę popytu, wiedząc, że oferta nie dotyczy realizacji wzorców krajowych, tylko klasy E1 odważników wzorcowych. Nie wiadomo, czy dla producentów odważników i terenowych laboratoriów metrologicznych atuty tego urządzenia będą wystarczające.

Wpływ na polską metrologię

Jedną z podstawowych przesłanek, uzasadniających korzyści z posiadania własnej wagi Kibble'a, jest długoterminowa perspektywa procesu realizacji wzorca kilograma. Docelowo wzorec ten powinien być jednoznacznie odtwarzalny w każdym zaawansowanym instytucie metrologicznym, ponieważ opiera się na zjawiskach fizycznych i określonej procedurze metrologicznej. W dużych krajach o wysokorozwiniętej gospodarce można sobie nawet wyobrazić sytuację, że poszczególne jednostki administracji terytorialnej, a nawet prywatne centra metrologiczne będą zainteresowane posiadaniem swoich własnych, pierwotnych wzorców masy.

Drugim wyróżnikiem docelowej redefinicji wzorca kilograma będzie wyeliminowanie złożonych procedur przekazywania jednostek o masach, będących wielokrotnościami i podwielokrotnościami kilograma, które zawsze prowadzą do poważnego wzrostu względnej niepewności wzorcowania. Procedury takie wymagają użycia najwyższej klasy komparatorów automatycznych, najlepiej w wersji próżniowej lub z komorą izobaryczną. W przyszłości te procedury przestaną być potrzebne, ponieważ będzie można konstruować dedykowane wagi Kibble'a do realizacji wzorców masy o określonej wartości, przy jednoczesnym zapewnieniu jak najmniejszych niepewności pomiarowych.

Dodatkową korzyścią z włączenia się Polski w prace nad projektem jest z całą pewnością zdobycie wiedzy i doświadczenia metrologicznego, które nie byłyby możliwe do pozyskania w przypadku zlecenia procedur wzorcowania podmiotom zewnętrznym (zagranicznym) lub nawet ewentualnego zakupu gotowej wagi Kibble'a. Włączenie się Polski w twórczy proces poszukiwania innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych, pozwoli wspólnie z międzynarodową społecznością metrologiczną zmniejszyć docelową niepewność wzorca kilograma, jak również zredukować koszty wytworzenia i utrzymania nowego wzorca masy.

Należy podkreślić, że istnieje daleko idąca zgodność pomiędzy ideą uruchomienia projektu polskiej wagi Kibble'a a zasadniczymi planami i zamierzeniami GUM, które zostały ujęte w prognostycznym opracowaniu pt. „Czteroletni strategiczny plan działania GUM 2018–2021” [39]. W załączniku 5 (Perspektywy rozwoju dziedzin pomiarowych GUM) została podana informacja,



że w dziedzinie nr 7 (Masa i wielkości pochodne) przewidziano (w punkcie nr 8 sekcji Działalność) udział GUM we współpracy krajowej i zagranicznej w ramach innowacyjnych projektów z zakresu metrologii masy. Ponadto w punkcie nr 1 (sekcji Planowane działania) przewidziano budowę infrastruktury metrologicznej, zapewniającej spójność pomiarową w dziedzinie masy po redefinicji kilograma. Jako konkretny przykład zapisano zakup automatycznego komparatora próżniowego, ale nie wykluczono też innych niezbędnych inwestycji aparaturowych. Generalnie analizowany udział GUM w polskim projekcie wagi Kibble'a wychodzi też naprzeciw ogólnej wizji i misji wspomnianego planu czteroletniego GUM. W rozdziale 3 tego opracowania odnajdujemy m.in. bezpośrednie odniesienia do implementacji *definicji podstawowych jednostek miar Międzynarodowego Układu Jednostek Miar (SI) opartych na zjawiskach kwantowych*. Całokształt sugerowanych działań wpisuje się w trendy rozwojowe wyznaczone przez międzynarodowe organizacje metrologiczne, takie jak EURAMET, NIST, NPL czy PTB.

Wpływ na polską gospodarkę

Zaangażowanie Polski w projekt wagi Kibble'a może mieć wieloaspektowe, pozytywne znaczenie dla polskiej gospodarki. Po pierwsze dostępność najwyższej klasy metrologii dla rodzimego przemysłu jest warunkiem poprawy stopnia jego innowacyjności i międzynarodowej konkurencyjności. Ten być może dość oczywisty, choć wciąż niedoceniany, fakt został ujęty w przywoływanym już czteroletnim planie rozwojowym GUM [39] w postaci obrazowego cytatu: *Metrologia, współtworząc postęp technologiczny, jest motorem rozwoju wszystkich dziedzin współczesnej gospodarki. Wychodzi naprzeciw wyzwaniom dynamicznie zmieniającego się świata, zapewniając precyzyjne i dokładne pomiary*. Ponadto, w ostatnim czasie GUM powołał do życia tzw. Konsultacyjne Zespoły Metrologiczne (KZM), których głównym zadaniem jest identyfikowanie potrzeb krajowego przemysłu w zakresie technologii pomiarowych [40]. Potrzeby polskiego przemysłu, związane z nowoczesną metrologią, są też rozpoznawane przez wiele innych grup eksperckich, w tym pracowników-wykładowców wyższych uczelni oraz pracowników laboratoriów badawczo-rozwojowych polskich firm innowacyjnych. Na potrzeby niniejszego opracowania udało się jednoznacznie ustalić, że nowoczesna metrologia masy (w tym posiadanie własnego wzorca masy nowej generacji) może bardzo skutecznie stymulować rozwój polskich firm zajmujących się m.in. produkcją najwyższej klasy wag i komparatorów masy, jak również firm farmaceutycznych oraz podmiotów, których zadaniem jest sprawny monitoring stanu środowiska naturalnego, w tym jakości powietrza (w kontekście palącej potrzeby walki

ze smogiem). Przedsiębiorstwa ze wspomnianych obszarów są bardzo często liderami polskiego eksportu i ich konkurencyjność na rynkach światowych bezpośrednio zależy od ich wiarygodności i aktualności metrologicznej (w sensie zarówno technicznym jak i prawno-legalizacyjnym).

Zgodnie z przyjętą przez polski rząd już w 2012 r. „Strategią Rozwoju Kraju 2020” [41]: *Okres do 2020 r. będzie dla światowego systemu społeczno-gospodarczo-politycznego czasem intensywnego poszukiwania modeli rozwoju, które uwzględniałyby doświadczenia kryzysu gospodarczego oraz globalne wyzwania związane z potrzebą dynamizowania potencjału innowacyjnego gospodarki i zapewnieniem stabilnych podstaw wzrostu*. Przytoczone już wcześniej argumenty pokazują, że nie będzie to możliwe bez nadążania za rozwojem współczesnej metrologii, a zwłaszcza metrologii masy, która znajduje się w przededniu swoistej rewolucji redefinicyjnej. W szczególności polski projekt wagi Kibble'a doskonale koresponduje z następującymi celami II Obszaru Strategicznego (Konkurencyjna gospodarka) strategii [42]:

Cel II.2. Wzrost wydajności gospodarki

II.2.1. Zwiększenie produktywności gospodarki

II.2.2. Wzrost udziału przemysłów i usług średnio i wysoko zaawansowanych technologicznie

Cel II.3. Zwiększenie innowacyjności gospodarki

II.3.1. Wzrost popytu na wyniki badań naukowych

II.3.2. Podwyższenie stopnia komercjalizacji badań

II.3.3. Zapewnienie kadr dla B+R

II.3.4. Zwiększenie wykorzystania rozwiązań innowacyjnych

W strategii odnajdujemy m.in. informację, że w 2009 roku udział przemysłów średniej i wysokiej technologii w produkcji sprzedanej w przemyśle wyniósł jedynie 31,7 % oraz, że ten wskaźnik należy bezwzględnie poprawić, przy zastosowaniu różnego rodzaju programów celowych oraz instrumentów inżynierii finansowej. Analizowany projekt wagi Kibble'a doskonale wpisuje się w tą strategię, gdyż sam wymaga zaangażowania firm zaawansowanych technologicznie, jak i służy rozwojowi firm innowacyjnych. Niestety „Perspektywa 2020” niedługo dobiega końca, a wszelkie środki unijne zostały już w większości przypadków rozdysponowane. W związku z powyższym naturalnie wydaje się obecnie odniesienie do nowszego dokumentu, który został przyjęty przez polski rząd w roku 2017, tj.: „Strategii na rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju do roku 2020 (z perspektywą do 2030 r.)” [42]. W jego wstępie Premier Mateusz Morawiecki zapowiedział m.in. że *w wyniku prac rządowych, eksperckich i konsultacyjnych wypracowaliśmy*

śmiałą wizję rozwojową połączoną z ekonomicznym pragmatyzmem, której celem jest wzmocnienie i unowocześnienie polskiej gospodarki, wyrwanie jej z peryferii rozwojowych oraz znaczące podniesienie konkurencyjności produktów i usług oferowanych przez polskie firmy. Służą temu, stworzone w ramach naszej Strategii, nowe instrumenty rozwoju (produkty finansujące i programy wsparcia) dla tak priorytetowych obszarów jak: ekspansja międzynarodowa, przemysł przyszłości, rozwój małych i średnich przedsiębiorstw, partnerstwo publiczno-prywatne, partnerstwo inwestycyjne z samorządami, rozwój rynku venture capital w Polsce, czy rozwój zrównoważony terytorialnie, ze szczególnym uwzględnieniem specjalnych stref oraz inwestycji w obszarach dotychczas zaniedbanych. Taka deklaracja w pewnym sensie daje zielone światło dla projektów takich jak polska waga Kibble'a. Dodatkowy argument za wsparciem projektu dostarcza pogłębiona analiza innowacyjności polskich przedsiębiorstw zawarta w strategii [42]. Jeżeli zastosuje się restrykcyjną miarę innowacyjności firmy nie jako sam stopień zaawansowania technologicznego, ale jako jego dynamikę, to okaże się, że w roku 2014 jedynie 8,8 % wartości produkcji polskich przedsiębiorstw zasługiwała na miano innowacyjnej, a jedynie połowa z tej wartości pochodziła z eksportu. Założona strategia przewiduje wzrost wartości produkcji innowacyjnej do poziomu 14 % w roku 2030. Żeby to zadanie osiągnąć, w części strategii „Rozwój innowacyjnych firm” obecny rząd RP przewiduje m.in. kierunek interwencji o nazwie „Mobilizacja kapitału prywatnego na rzecz prowadzenia działalności B+R+I, zwiększenie potencjału rynkowego prowadzonych badań oraz stopnia komercjalizacji wyników prac B+R”. Zapisane są przy tym m.in. następujące, konkretne działania interwencyjne:

- współfinansowanie z publicznych środków projektów B+R, realizowanych przez podmioty gospodarcze,
- silne wsparcie dla rozwiązań innowacyjnych, które dodatkowo mają pozytywny wpływ na środowisko naturalne,
- animowanie współpracy między sektorem nauki a biznesem oraz powstawania strategicznych partnerstw biznesowych.

Odwołując się bezpośrednio do tekstu strategii warto zwrócić uwagę, że *po 2020 r. fundusze unijne będą nadal stanowiły istotne źródło finansowania inwestycji rozwojowych w Polsce, ale ze względu na wzrost zamożności polskich regionów, ich udział w całkowitej puli środków rozwojowych i znaczenie będą relatywnie mniejsze (realna waga tych środków będzie mniejsza w relacji do PKB i do ogółu środków rozwojowych)*. Pomimo tej zmiany nowa perspektywa unijna i prognozy dynamiki rozwoju naszego kraju są korzystne w kontekście konstrukcji i realizacji takich projektów jak waga Kibble'a, ponieważ lokują je

pośród priorytetów wspierających innowacyjność przemysłowo-gospodarczą.

Oddziaływanie międzynarodowe

Mimo, że niniejsza analiza dotyczy polskiego projektu wagi Kibble'a, nie sposób rozpatrywać ją w oderwaniu od kontekstu międzynarodowego. Wiele aspektów międzynarodowych już zostało wymienionych, m.in. idea i geneza konstrukcji wagi Kibble'a, finansowanie unijne, chęć zwiększenia konkurencyjności na rynkach międzynarodowych. Jednak na szczególną uwagę zasługują potencjalne interakcje polskiej metrologii z państwami ościennymi w obliczu redefinicji jednostki miary masy SI. Część krajów naszego regionu jest znacznie słabiej rozwinięta technologicznie i wytwarza wyraźnie mniejsze PKB per capita niż Polska. Jest zatem mało prawdopodobne, że kraje te zdecydują się na samodzielne projekty związane z budową wag Kibble'a. Tym bardziej więc, rola Polski jako lidera regionu, predestynuje nasz kraj do podjęcia się niewątpliwie złożonego i trudnego wyzwania, jakim jest budowa wagi Kibble'a. Zainteresowanie wykorzystaniem docelowych efektów polskiego projektu zadeklarowały już m.in. Litwa, Łotwa, Ukraina i Białoruś. Do kręgu państw zainteresowanych można zaliczyć również Czechy, Słowację, Węgry i Rumunię oraz kraje półwyspu bałkańskiego. Tak silny odzew międzynarodowy stanowi szczególnie mocne i wymowne uzasadnienie celowości analizowanego projektu, jak również otwiera perspektywę osiągania przez Polskę dochodów finansowych, wynikających ze świadczenia w przyszłości usług metrologicznych, na najwyższym światowym poziomie. Biorąc jednak pod uwagę realia technologiczne i ekonomiczne, polski projekt wagi Kibble'a obejmował będzie zakres subkilogramowy (najprawdopodobniej 1 grama).

Ocena wykonalności projektu

Istniejące zasoby GUM

1. Pracownia Wag i Wzorców Masy

Państwowym wzorcem jednostki masy w Polsce jest prototyp 1 kg nr 51, którego masa została wyznaczona w wyniku porównania z wzorcem pierwotnym w roku 1990, utrzymywanym w Międzynarodowym Biurze Miar. W dniu 14 czerwca 1990 roku wynosiła:

$$m = 1 \text{ kg} + 227 \text{ } \mu\text{g}.$$

Złożona niepewność standardowa wyznaczenia wartości masy prototypu wynosi:

$$u_c = 2,3 \text{ } \mu\text{g}.$$

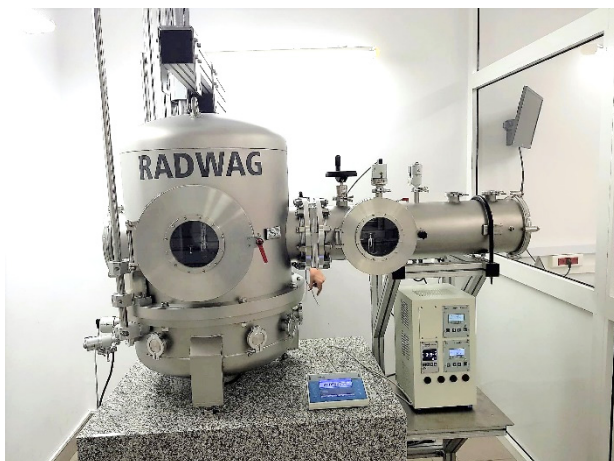
Od roku 1889 definicja i realizacja jednostki masy opiera się na materialnym wzorcu kilograma, znajdującym



się w Międzynarodowym Biurze Miar (BIPM) w Sèvres pod Paryżem. Kopie międzynarodowego wzorca wykonane z tego samego materiału (stop 90 % platyny i 10 % irydu) o takich samych wymiarach i takich samych właściwościach powierzchniowych są używane do przekazywania jednostki masy na najwyższym poziomie spójności pomiarowej (hierarchicznego układu sprawdzeń).

Pracownia Wag i Wzorców Masy jest zainteresowana wieloma aspektami prac w obszarach redefinicji kilograma. Przed redefinicją międzynarodowy prototyp kilograma o masie 1 kg przekazuje jednostkę masy wzorcom wtórnym, aby w trakcie porównań (wagi Kibble'a) określić jak najdokładniej wartość liczbową stałej Plancka h .

W ostatnim czasie, w Pracowni Wag i Wzorców Masy zbudowano (aktualnie jest na etapie testów) nowe stanowisko kilograma wzorca państwowego wyposażone w próżniowy, automatyczny komparator masy (rys. 3) pro-



Rys. 3. Automatyczny, próżniowy komparator masy AVK-1000 (z systemem „load-lock”) w GUM

dukcyj polskiej [43] o obciążeniu maksymalnym 1 kg, z działką elementarną 0,1 μg . Urządzenie oferuje prowadzenie pomiarów w próżni o wartości 10^{-6} mbar lub w atmosferze gazów szlachetnych i neutralnych. Po zakończonym etapie testów możliwe będzie wykonanie pomiarów masy z jeszcze wyższą dokładnością. Precyzyjność i dokładność pomiarów może zostać wykorzystana w przyszłości w etapie realizacji projektu wagi Kibble'a.

2. Pracownia Wzorców Wielkości Elektrycznych Samodzielnego Laboratorium Elektryczności i Magnetyzmu

Pracownia Wzorców Wielkości Elektrycznych Samodzielnego Laboratorium Elektryczności i Magnetyzmu realizuje, oparte na stałych podstawowych, kwantowe wzorce wielkości elektrycznych [4]. Niezbędne dla konstrukcji wagi Kibble'a wzorce napięcia elektrycznego

stałego oraz rezystancji są utrzymywane w GUM. Stanowią one wzorce pierwotne, bazujące odpowiednio na zjawisku Josephsona oraz kwantowym zjawisku Halla.

Układ odtwarzający jednostkę napięcia elektrycznego JVS (Josephson Voltage Standard) w 2003 roku ustanowiony został Państwowym Wzorcem Jednostki Miary Napięcia Elektrycznego Stałego. W skład tego układu pomiarowego wchodzi m.in. matryca złącz Josephsona o napięciu znamionowym wynoszącym 10 V, oscylator na bazie diody Gunna, częstotściomierz z pętlą PLL i multiplexer MUX. Napięcie wzorcowe, otrzymywane na matrycy złącz Josephsona, wykorzystywane jest w kolejnym etapie do wzorcowania, opartych na diodach Zenera, wzorcowych źródeł odtwarzających napięcie elektryczne stałe. Wzorzec napięcia stałego w GUM umożliwia realizację jednostki z zakresu od -10 V do 10 V z rozszerzoną niepewnością względną wynoszącą $5 \cdot 10^{-9}$.

Stanowisko odtwarzające jednostkę rezystancji w GUM oparte jest na kwantowym zjawisku Halla obserwowanym w heterostrukturach GaAs/AlGaAs. Wykorzystanie drugiego i czwartego charakterystycznego plateau funkcji $R_{xy}(B)$ pozwala na odtworzenie wartości rezystancji, wynoszącej odpowiednio 12 906,4035 Ω oraz 6453,201 75 Ω . Stanowisko pomiarowe składa się między innymi z komory kriogenicznej z próbką hallowską, elektromagnesu nadprzewodzącego z układem zasilającym, źródła prądowego oraz układu mierzącego rezystancję, bazującego na multimetrze cyfrowym. W 2016 roku system ten ustanowiony został Państwowym Wzorcem Jednostki Miary Rezystancji. Niepewność rozszerzona względna odtwarzania jednostki sięga $6,8 \cdot 10^{-10}$. Stosowany w GUM specjalistyczny komparator prądowy umożliwia bezpośrednie przekazanie jednostki z wzorca kwantowego na rezystory o wartości nominalnej 100 Ω z niepewnością względną rzędu 10^{-8} .

3. Samodzielne Laboratorium Czasu i Częstotliwości

Zdolności pomiarowe Samodzielnego Laboratorium Czasu i Częstotliwości GUM, formalnie na poziomie $< 2 \cdot 10^{-14}$ niepewności standardowej względnej, są obecnie o 4–5 rzędów wielkości wyższe niż wymagania wagi Kibble'a dla pomiarów poszczególnych wartości wielkości mierzonych i nie stanowią ograniczenia w zakresie możliwości zapewnienia spójności pomiarowej dla pomiarów grawimetrycznych, prędkości i częstotliwości poprzez wzorcowanie w odniesieniu do Państwowego Wzorca Jednostek Miar Czasu i Częstotliwości lub dostarczenie wzorcowych sygnałów częstotliwości. Jako lokalne źródło wzorcowego sygnału częstotliwości i sygnału synchronizującego pracę poszczególnych elementów wagi Kibble'a może być użyty wywzorcowany wzorcowy generator rubidowy, którego odtwarzalność oraz

krótko- i długoterminowe wahania częstotliwości w praktyce nie powinny przekraczać 10^{-11} wartości względnej. W zależności od lokalizacji wagi Kibble'a, możliwe też jest bezpośrednie wykorzystanie wzorcowych sygnałów częstotliwości z Państwowego Wzorca Jednostek Miar Czasu i Częstotliwości, przesyłanych lokalnie lub za pośrednictwem sieci światłowodowej.

4. Pracownia Długości

Pierwotnym wzorcem w obszarze długości jest stanowisko pomiarowe, składające się z syntezy (grzebień) częstotliwości optycznych oraz lasera helowo-neonowego stabilizowanego jodem, stanowiące Państwowy Wzorzec Jednostki Miary Długości. Syntezator częstotliwości optycznych jest układem pomiarowym odtwarzającym wzorcowe długości fal promieniowania laserowego z wykorzystaniem lesera femtosekundowego i światłowodów mikrostrukturalnych. Cały układ pomiarowy zsynchronizowany jest z sygnałem Państwowego Wzorca Jednostek Miar Czasu i Częstotliwości. Stanowisko zapewnia spójność pomiarową w dziedzinie długości poprzez wzorcowanie stabilizowanych laserów metrologicznych, głowic interferometrów laserowych oraz laserów helowo-neonowych stabilizowanych jodem w zakresie długości fali promieniowania ($532 \div 1064$) nm, wykorzystując metodę zdudnienia optycznego z niepewnością względną 10^{-13} . Stanowisko pomiarowe umożliwia wyznaczenie wartości częstotliwości oraz jej stabilności dla głowicy interferometru laserowego wykorzystanego w układzie pomiarowym wagi Kibble'a. Dodatkowo Pracownia Długości prowadzi również prace nad rozwojem metod pomiaru współczynnika załamania światła w powietrzu, a tym samym umożliwia wzorcowanie kompensujących układów pomiarowych interferometrów laserowych.

Współpraca z polskimi firmami

Podstawą powodzenia realizacji polskiego projektu wagi Kibble'a jest zaangażowanie się polskich firm, reprezentujących szczególnie wysoki poziom zaawansowania technologicznego swojej produkcji i usług. Fakt ten jest podkreślany wielokrotnie w niniejszej analizie. W tym miejscu zostaną podane informacje, które będą czytelnym uzasadnieniem wyboru głównych uczestników przyszłego konsorcjum. Realizacja projektu wydaje się całkowicie niemożliwa bez udziału wiodącej krajowej firmy, która jest jedyną w Polsce i tylko jednym z trzech na świecie producentów komparatorów do krajowych wzorców masy. Z tego względu firma ta mogłaby zostać naturalnym dostawcą dedykowanego komparatora kompensacyjnego do wagi Kibble'a. Przewaga rodzimej firmy przejawia się

w większej elastyczności i gotowości do przeprojektowania urządzeń dostępnych katalogowo w przypadku niestandardowych potrzeb rozwojowych. Warto dodać, że w tym przypadku konieczne będzie nie tylko wykonanie nietypowego komparatora masy, ale również jego sprzężenie z zasadniczym mechanizmem wagi Kibble'a. Ponadto główny ciężar zaprojektowania siłownika wagi Kibble'a (w tym cewki i obwodu magnetycznego z magnesami stałymi) również spocząłby na konstruktorach z tej firmy, ze względu na to, że jako jedyna w Polsce ma doświadczenie w tym zakresie, a firmy zagraniczne niechętnie przyjmują niestandardowe zlecenia, dyktując ceny zaporowe. Firma ta będzie również brana pod uwagę, jako potencjalny wykonawca głównego szkieletu i obudowy wagi, a w dalszej przyszłości może też wykonać konstrukcję wagi Kibble'a do pomiarów masy w warunkach próżniowych. Przesłanką do takiego wskazania jest duże osiągnięcie technologiczne firmy, które zaowocowało w ostatnim czasie wdrożeniem do produkcji komparatora próżniowego, zbudowanego wg własnego projektu.

Innym przykładem polskiej firmy innowacyjnej jest firma, która może odegrać ważną rolę w realizacji polskiego projektu wagi Kibble'a. Specjalizuje się ona w niszowej produkcji urządzeń do spektrometrii mösbauerowskiej, która jest naturalną metodą jądrową, stosowaną do badań m.in. nanomateriałów magnetycznych na bazie żelaza. Szczególna przydatność tej firmy w realizacji polskiego projektu wagi Kibble'a wynika z faktu, że jako jedyna na świecie, spośród producentów spektrometrów mösbauerowskich, specjalizuje się w produkcji kalibratorów laserowych do napędów wibracyjnych. Zarówno wspomniane kalibratory z interferometrami laserowymi, jak i same napędy, mogłyby być wykorzystane w wadze Kibble'a. Istnieje szansa, że wymagana będzie jedynie niewielka rekonfiguracja urządzeń. Gdyby jednak okazało się, że wymagane będzie gruntowne przeprojektowanie układu, firma jest do tego przygotowana. Warto podkreślić, że firma ta od podstaw potrafi konstruować układy optyczne interferometrów, dzięki czemu jest w stanie dostosować je do ściśle określonych potrzeb (np. dotyczących miniaturyzacji czy też pracy w warunkach próżniowych). Poza tym, eliminując konieczność korzystania z komercyjnych, gotowych interferometrów, firma redukuje znacząco koszty docelowych urządzeń. Ma również doświadczenie w projektowaniu obwodów magnetycznych z magnesami stałymi do precyzyjnych napędów oraz jest w stanie koordynować montaż układów mechatroniczno-optycznych, a więc takich, jakie występują w wadze Kibble'a.

Przykładów polskich firm, które mogą pomóc w realizacji polskiego projektu wagi Kibble'a, jest znacznie więcej. Oczywiście krąg potencjalnych wykonawców nie ogranicza się jedynie do polskich przedsiębiorstw



innowacyjnych. Przed podjęciem decyzji o ostatecznym wyborze wykonawców zostaną wdrożone wszelkie niezbędne i wymagane prawnie procedury ewaluacji ofert, zgodnie z wymogami adekwatnymi dla określonych źródeł finansowania.

Współpraca z polskimi uczelniami

Realizacja polskiego projektu wagi Kibble'a nie będzie możliwa bez udziału polskich uczelni, które w ostatnich latach coraz chętniej współpracują z przemysłem i partycypują w pracach wdrożeniowych. Poza tym są motorem innowacyjności w podstawowych gałęziach techniki, do których bez wątpienia zalicza się współczesna metrologia.

Jedną z uczelni bardzo silnie zaangażowanych w strategiczną analizę polskiego projektu wagi Kibble'a jest Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu (dawniej Politechnika Radomska). Pracownicy Katedry Fizyki na Wydziale Mechanicznym posiadają bogate doświadczenie we współpracy z przemysłem w zakresie metrologii, technik próżniowych i kriogenicznych oraz ultrastabilnych temperaturowo materiałów magnetycznych do wag analitycznych i komparatorów masy. Kolejnym obszarem kompetencji pracowników Katedry Fizyki są symulacje metodą elementów skończonych (MES-FEM) obwodów magnetycznych z magnesami stałymi (niezbędnych m.in. do siłownika wagi Kibble'a). Poza tym Wydział Mechaniczny posiada też wyspecjalizowaną kadrę w zakresie mechanicznych symulacji FEM-MES, komputerowego projektowania CAD-CAE, programowania obrabiarek CNC oraz zaawansowanych metod statystycznych w metrologii. Jeden z pracowników Katedry Fizyki podjął się merytorycznego nadzoru nad realizacją całokształtu polskiego projektu wagi Kibble'a.

Kolejną uczelnią, która może okazać się pomocna w realizacji projektu polskiej wagi Kibble'a, jest Politechnika Świętokrzyska w Kielcach. Jak już wspomniano, docelową lokalizacją laboratorium nowego wzorca masy będzie powstający w Kielcach świętokrzyski kampus laboratoryjny Głównego Urzędu Miar. Rektor Politechniki Świętokrzyskiej zadeklarował w ostatnim czasie, że na tej kieleckiej uczelni technicznej zostaną uruchomione nowe kierunki kształcenia, związane z metrologią. Najbardziej predystynowane do utworzenia tego typu kierunków kształcenia i specjalności metrologicznych są: Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki oraz Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn. Politechnika Świętokrzyska już w 2020 roku może stać się naturalnym dostawcą wyspecjalizowanej kadry do świętokrzyskiego kampusu laboratoryjnego GUM. Oznacza to, że absolwenci tej uczelni mogą

być pracownikami laboratorium nowego wzorca masy, bazującego na polskiej wadze Kibble'a oraz uczestniczyć w jego sukcesywnym rozwoju.

Uczelnią, która już od wielu lat współpracuje z Głównym Urzędem Miar w Warszawie, jest Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu. Najbardziej zaangażowanym w tą współpracę jest Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej. Na tym wydziale, w Instytucie Fizyki funkcjonuje Krajowe Laboratorium Fizyki Atomowej, Molekularnej i Optycznej (KL FAMO), które jest ogólnopolską międzyuczelnianą jednostką badawczą, utworzoną w celu umożliwienia prowadzenia w Polsce doświadczalnych badań na światowym poziomie z zakresu fizyki atomowej, molekularnej i optycznej. Istotną rolą KL FAMO jest integracja polskiego środowiska fizyków atomowych, molekularnych i optycznych oraz wzmacnianie ich udziału w europejskiej współpracy naukowej. Z punktu widzenia praktycznej metrologii najważniejszym i najbardziej innowacyjnym układem w tym laboratorium jest Polski Optyczny Zegar Atomowy sprzężony ze wzorcem czasu UTC, realizowanym w Obserwatorium Astrogeodynamicznym PAN w Borowcu pod Poznaniem oraz z urzędowym wzorcem czasu UTC(PL) w Głównym Urzędzie Miar w Warszawie i odniesiony do uniwersalnego czasu światowego. Polski Optyczny Zegar Atomowy to w rzeczywistości układ dwóch wzorcowych źródeł światła (bazujących na atomach strontu), połączonych z ultrawąskim spektralnie laserem z tzw. optycznym grzebieniem częstotliwości. Doświadczony personel naukowo-techniczny, który pracuje przy tym zaawansowanym układzie optycznym, mógłby być bardzo pomocny przy konstruowaniu i konfigurowaniu laserowych układów interferometrycznych, niezbędnych do pracy wagi Kibble'a.

Ryzyko wykonalności projektu

Jak w przypadku każdego długoterminowego projektu innowacyjnego projekt polskiej wagi Kibble'a jest obarczony ryzykiem zaistnienia okoliczności utrudniających jego realizację. Natura tych czynników ryzyka jest złożona i różnorodna. Obejmuje ona zarówno kwestie techniczne, finansowe, jak i organizacyjne. Przygotowując projekt o charakterze pionierskim nie jest możliwe ścisłe zaplanowanie wszystkich punktów harmonogramu działań, ponieważ nie są do końca znane wszystkie aspekty techniczne zagadnienia. Jak już wspomniano w niniejszej analizie, zespoły międzynarodowe, które już realizują projekty wagi Kibble'a, bardzo często zmieniają koncepcje konstrukcyjne lub pracują nad kilkoma różnymi, alternatywnymi wariantami projektowymi. Zgodnie z informacjami zawartymi w rozdziale dotyczącym wyboru koncepcji, najpoważniejszym dylematem w polskim projekcie

będzie wybór między konstrukcją wagi Kibble'a o konstrukcji z ruchomą cewką a wariantem z ruchomym magnesem. Decyzja rozstrzygająca zapadnie po dalszym, dokładnym rozpoznaniu. Konieczne do tego będą konsultacje z partnerami zagranicznymi oraz ekspertyzy specjalistów z polskich firm i uczelni zaangażowanych w projekt. Nigdy jednak nie ma całkowitej pewności czy wybór będzie trafny, a jego zasadność zostanie zweryfikowana dopiero w praktyce, dzięki testom i eksperymentom. Ewentualna konieczność korekty przyjętych rozwiązań lub całkowitej zmiany koncepcji pociągnie za sobą nieunikniony wzrost kosztów realizacji pionierskiego projektu i wydłuży czas jego wykonania. Ponadto mogą się pojawić zupełnie nieprzewidziane problemy techniczne, które niekoniecznie skłonią do modyfikacji koncepcji, ale niekorzystnie wpłyną na terminowość wykonania oraz na wysokość docelowego budżetu projektu.

Kolejnym zagrożeniem dla projektu polskiej wagi Kibble'a mogą być trudności lub opóźnienia w pozyskaniu środków na jego realizację. Wszelkie procedury konkursowo-grantowe oraz planowanie budżetu GUM rządzą się określonymi regułami, które wymagają działań z dużym wyprzedzeniem. Z racji tego, że projekt polskiej wagi Kibble'a dopiero powstaje, to przy bardzo optymistycznych założeniach, środki na jego realizację będzie można pozyskać najwcześniej za rok. Nie wiadomo też dokładnie, jakiego typu konkursy ogłoszone zostaną przez NCBiR oraz NCN w najbliższym czasie, jakie dodatkowe środki budżetowe na projekt może otrzymać bezpośrednio GUM i jakie formy dystrybucji funduszy unijnych zostaną udostępnione. Wydaje się jednak, że nie istnieje duże ryzyko negatywnej oceny merytorycznej projektu polskiej wagi Kibble'a ze względu na jego innowacyjność i znaczenie strategiczne. Zasadniczą sprawą będzie oczywiście jakość napisania wniosku oraz dobór konsorcjantów i wykonawców. Nie wiadomo jednak, jaki będzie górny limit wysokości dofinansowania przyznawanego w ramach ogłaszanych konkursów grantowych. Całkowity koszt projektu polskiej wagi Kibble'a, oszacowany wstępnie na 5 mln złotych nie wydaje się zbyt wygórowany, biorąc pod uwagę złożoność materii i pionierskość rozwiązań. Warto w tym miejscu dodać, że np. gotowy i seryjnie produkowany przyrząd, jakim jest skaningowy mikroskop elektronowy z emisją polową i mikroanalizą rentgenowską, kosztuje właśnie tyle, ile wynosić ma wstępny budżet polskiej wagi Kibble'a, którą dopiero należy skonstruować. W przypadku trudności w pozyskaniu całości środków na projekt z jednego źródła finansowania, można projekt podzielić na etapy i występować kolejno o częściowe dofinansowania z różnych źródeł i konkursów. To rozwiązanie, choć nieco komplikowałoby i wydłużało proces realizacji projektu, miałoby też zaletę, polegającą na tym, że przy takim podejściu budżet projektu nie jest odgórnie domknięty

i ograniczony. Dzięki temu, w sytuacji przekroczenia wstępnie szacowanych kwot kosztorysowych, w uzasadnionych przypadkach można byłoby występować o kolejne transe na zasadzie dodatkowych konkursów lub innych dofinansowań. Warto też podkreślić, że zaproponowana w niniejszej analizie całkowita wysokość środków na projekt polskiej wagi Kibble'a dotyczy prototypowej wersji urządzenia. Biorąc pod uwagę doświadczenia innych zespołów międzynarodowych, już od kilku lat pracujących nad konstrukcją wag Kibble'a, konstrukcja prototypowa wymaga wielu dalszych działań korekcyjno- optymalizacyjnych, zwłaszcza gdy zależy nam na sprawnej, powtarzalnej produkcji wielu egzemplarzy wagi. W szczególności konieczne będą projekty dotyczące realizacji wzorców masy mniejszych niż jeden kilogram. Wobec powyższego, po realizacji projektu polskiej wagi Kibble'a w wersji prototypowej celowym stanie się występowanie o środki na kolejne wnioski związane z realizacją wersji docelowej takiej wagi dla wzorca kilograma oraz wag dla wzorców subkilogramowych.

Współpraca zagraniczna

W dotychczasowej analizie projektu już po wielokroć przewijały się różnego rodzaju aspekty międzynarodowe. W tym miejscu chcielibyśmy jednak uwypuklić kwestię perspektywy realnej współpracy międzynarodowej podczas realizacji poszczególnych etapów projektu. I tak, w fazie wstępnej (rozpoznawczej), która w zasadzie już się rozpoczęła, zespół roboczy intensywnie wykorzystuje swoje kontakty z międzynarodowymi środowiskami metrologicznymi. Celem tych kontaktów jest pozyskanie wiedzy i doświadczenia, którym dysponują i chcą się podzielić zagraniczne ośrodki już od lat zaangażowane w analogiczne projekty. Na uwagę zasługują zwłaszcza robocze spotkania i rozmowy konferencyjne z przedstawicielami laboratorium masy oraz kwantowych wzorców elektrycznych w BIPM w Sèvres. Jednakże specjalnego znaczenia nabierają niedawno zapoczątkowane (i w ostatnim czasie bardzo zintensyfikowane) relacje między GUM a Krajowym Instytutem Metrologicznym w Turcji (National Metrology Institute / Ulusal Metroloji Enstitüsü, UME). Instytut ten funkcjonuje dzięki bezpośredniemu wsparciu finansowemu tureckiej agencji rządowej, odpowiedzialnej za rozwój innowacyjnych technologii (Scientific and Technological Research Council of Turkey, Türkçe Scientific and Technological Research Council of Turkey, TÜBİTAK). Należy podkreślić, że współpraca z tureckim Krajowym Instytutem Metrologicznym została ostatnio zinstytucjonalizowana dzięki międzynarodowym umowom partnerskim. Strona turecka nie ogranicza się jedynie do kooperacji z samym GUM, gdyż prowadzi ożywioną współpracę z polskimi firmami zajmującymi



się metrologią masy na najwyższym poziomie. Ta współpraca dotyczy m.in. zagadnień związanych z próżniowymi komparatorami masy, jak również tureckiego projektu wagi Kibble'a. Dzięki tym interakcjom pojawiła się realna szansa na to, by część polskiego i tureckiego projektu realizować wspólnie. Jak już wspomniano w sekcji dotyczącej wyboru koncepcji, turecki pomysł na wagę Kibble'a bez ruchomej cewki, lecz z ruchomym magnesem wydaje się atrakcyjny pod względem technologicznym, chociaż ma też swoje ograniczenia. Być może częściowe uwspólnienie realizacji projektu tureckiego i polskiego zaowocuje wypracowaniem nowego, zoptymalizowanego rozwiązania. Obydwu stronom tego partnerstwa zależy na dobrej, owocnej współpracy, gdyż jej finalny sukces może przyczynić się do zwiększenia wzajemnej pozycji w obszarach leżących wyraźnie poza regionami dotychczasowego oddziaływania.

Wnioski

Zgodnie z zapowiedzią zawartą we Wprowadzeniu, zasadniczym powodem przeprowadzenia niniejszej analizy było stworzenie podstawy do podjęcia decyzji o rozpoczęciu realizacji polskiego projektu wagi Kibble'a. Rozpatrywana materia okazała się szczególnie złożona, zarówno pod względem merytorycznym, jak i organizacyjno-strategicznym. Mimo to udało się zebrać i uporządkować fakty oraz argumenty, które umożliwiają sformułowanie finalnych konkluzji. We wszystkich aspektach analizy celowości projektu pojawiają się wskazania przemawiające za podjęciem jego realizacji.

Kluczowa konkluzja dotyczy wyboru odpowiedniego wariantu projektu. Doświadczenia najbogatszych i zaawansowanych technologicznie krajów na świecie sugerują, że Polska niekoniecznie powinna angażować się w projekt wagi Kibble'a na jeden kilogram. Jednak biorąc pod uwagę perspektywę długookresową wykazano, że całkowite zaniechanie projektu mogłoby bardzo negatywnie wpłynąć na polską metrologię oraz gospodarkę, której stopień innowacyjności jest wciąż niedostateczny. Taka postawa pozostawałaby w wyraźnej sprzeczności ze strategiami rozwoju kraju, uchwalanymi przez kolejne ekipy rządowe. Zwłaszcza w świetle perspektywy rozwojowej do roku 2030, nakreślonej ostatnio przez premiera Mateusza Morawieckiego, rezygnacja z realizacji takiego projektu jak polska waga Kibble'a, byłaby poważnym błędem strategicznym.

Wobec powyższych argumentów wskazano kilka projektów alternatywnych, które mają duże szanse na realizację. Projekt zasadniczy (dla którego opracowano kompletny harmonogram i kosztorys) to polska kompaktowa waga Kibble'a na zakresy małych mas (gramy, miligramy). Projektu tego nie należy traktować jako „namiastki”

projektu wagi Kibble'a na 1 kg. Jego realizacja staje się koniecznością w świetle rezolucji redefinicyjnej 26. Generalnej Konferencji Miar. Należy więc zbudować dedykowany wzorzec pierwotny jednostki masy w postaci kompaktowej wagi Kibble'a. Jednakże realizacja polskiej edycji tego projektu wymagałaby bardzo ścisłej współpracy z dwoma ośrodkami na świecie (LNE we Francji i NIST w USA), które uwspólniają działania i zapraszają Polskę do częściowej partycypacji w ich projekcie na zasadzie wymiany doktorantów i doktorów. Kolejną możliwością to zakup zminiaturyzowanej wersji wagi Kibble'a z brytyjskiego NPL na zakres 100 gramów. Oferta wydaje się korzystna cenowo (zwłaszcza, że połączona jest z kilkumiesięcznym szkoleniem), ale niestety do tej pory nie ma kompletnej specyfikacji technicznej urządzenia. Za działanie komplementarne uznano już rozpoczęty projekt kontenera próżniowego, którego celem jest zapewnienie próżniowego transportu wzorców materialnych do międzynarodowych instytutów metrologicznych, posiadających wagi Kibble'a. Pierwszym, wykonanym już przez GUM, krokiem w tym kierunku jest zakup komparatora próżniowego z systemem „load-lock”. Rozwinięciem tych działań mógłby być też naukowy projekt badań nad wpływem transferu próżnia-powietrze na masę i na stan powierzchni wzorców masy wykonanych z różnych materiałów. Warty wzięcia pod uwagę jest też projekt tzw. wagi Plancka (z niemieckiego PTB), opartej na komercyjnym komparatorze masy, a więc łatwej do komercjalizacji.

Istotną motywacją do podjęcia się przez Polskę realizacji jednego z wariantów projektu wagi Kibble'a są przewidywane efekty jego oddziaływania międzynarodowego. Polska ma szansę stać się prawdziwym liderem metrologii w naszym regionie oraz wypracować sobie znaczącą pozycję również pośród partnerów z innych obszarów geograficznych, np. takich jak Turcja. Jednocześnie przy realizacji projektu polskiego wskazano na konieczność ścisłej współpracy z tymi instytutami metrologicznymi na świecie, których realizowane projekty są już w fazie znacznego zaawansowania (zwłaszcza francuskiego LNE, amerykańskiego NIST oraz brytyjskiego NPL).

Ocena wykonalności projektu sygnalizuje potencjalne zagrożenia, które mogą utrudniać realizację projektu, zwłaszcza, że w tak innowacyjnej materii nie wszystko da się przewidzieć z odpowiednim wyprzedzeniem. W szczególności można spodziewać się opóźnień w pozyskiwaniu niezbędnych środków finansowych na projekt oraz trudności w terminowej realizacji poszczególnych działań wymienionych w harmonogramie. Mimo to pięcioletnia perspektywa projektu wydaje się wystarczająca, przynajmniej do skonstruowania prototypowej wersji wagi Kibble'a na zakres małych mas. Podobnie jak inne zespoły w zagranicznych instytutach metrologicznych, które zaczęły już pracę nad wagą Kibble'a, również polskie

środowisko metrologiczne powinno być gotowe do stawienia czoła wyzwaniom natury zarówno technicznej, jak i finansowo-organizacyjnej. W analizie wykonalności wykazano, że właściwym sposobem radzenia sobie ze spodziewanymi problemami jest ścisła współpraca GUM z firmami-liderami polskiej branży metrologicznej, jak również z polskimi ośrodkami akademickimi. Kolejną optymistyczną przesłanką jest aktualny stan posiadania GUM kwantowych wzorców elektrycznych, jak i atomowych wzorców czasu oraz nakreślone perspektywy rozbudowy GUM w ramach kampusu świętokrzyskiego. Dodatkowego wsparcia w realizacji projektu można się spodziewać ze strony zagranicznych partnerów GUM.

Biorąc pod uwagę przedstawione wyniki analizy strategicznej, Zespół jednoznacznie rekomenduje realizację polskiego projektu wagi Kibble'a na zakres małych mas oraz kilka mniejszych projektów komplementarnych. Autorzy analizy żywią nadzieję, że niniejsza rekomendacja będzie czynnikiem skutecznie motywującym zarówno polskie środowisko metrologiczne, akademickie, jak i polski przemysł innowacyjny oraz polskie władze do podjęcia i wspierania prac związanych z projektem. Oczywistym warunkiem powodzenia tego przedsięwzięcia jest zapewnienie odpowiednich środków finansowych (głównie budżetowych i unijnych).

Podziękowania

Autorzy artykułu pragną złożyć podziękowania Panu Michałowi Soleckiemu oraz Pani Agnieszce Żukowskiej za pomoc w jego opracowaniu. Szczególne uznanie autorzy wyrażają Panu Włodzimierzowi Lewandowskiemu, za twórczą inspirację, która doprowadziła do powstania artykułu.

Literatura

- [1] Mills I., Mohr P., Quinn T., Taylor B., Williams E., Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come. *Metrologia*, vol. 42 (2005), s. 71–80.
- [2] Ossowski R., Przegląd aktualnej wiedzy na temat prowadzonych badań nad redefinicją jednostki masy (stan na koniec 2013 r.). *Biuletyn GUM*, nr 1-2 (2014), s. 25–29.
- [3] Consultative Committee for Mass and Related Quantities (CCM): Report of the 12th meeting (26 March 2010) to the International Committee for Weights and Measures. Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres.
- [4] Dudek E., Mosiądz M., Orzepowski M., Wzorce wielkości elektrycznych oparte na zjawiskach kwantowych. *Biuletyn GUM*, nr 3 (2009), s. 3–16.
- [5] Zięba A., Kwantowy układ SI – podstawy fizyczne i perspektywy przyjęcia. *Biuletyn GUM*, nr 1-2 (2015), s. 14–19.
- [6] Resolutions of the 26th CGPM. Versailles, 13–16 November 2018.
- [7] Steiner R., Newell D., Williams E., A result from the NIST watt balance and an analysis of uncertainties. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 48 (1999), s. 205–208.
- [8] Kibble B., Robinson I., Principles of a new generation of simplified and accurate watt balances. *Metrologia*, vol. 51 (2014), s. S132–S139.
- [9] Haddad D., Seifert F., Chao L., Li S., Newell D., Pratt J., Williams C., Schlamminger S., Invited Article: A precise instrument to determine the Planck constant, and the future kilogram. *Review of Scientific Instruments* 87 (2016), 061301.
- [10] Steiner R., Newell D., Williams E., Details of the 1998 watt balance experiment determining the Planck constant. *Journal Research of the NIST*, vol. 110 (2005), s. 1–26.
- [11] Haddad D., Seifert F., Chao L., Cao A., Sineriz G., Pratt J., Newell D., Schlamminger S., First measurements of the flux integral with the NIST-4 watt balance. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64 (2015), s. 1642–1649.
- [12] Seifert F., Newell D., Chao L., Haddad D., Pratt J., Schlamminger S., Monitoring gravity for the NIST-4 watt balance. *Proc. of IEEE 2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, 2016, 1–2.
- [13] Leaman E., Haddad D., Seifert F., Chao L., Cao A., Pratt J., Schlamminger S., Newell D., A determination of the local acceleration of gravity for the NIST-4 watt balance. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64 (2015), s. 1663–1669.
- [14] Jarrett D., Elmquist R., Kraft M., Quantum Hall Resistance Traceability for the NIST-4 Watt Balance. *Proc. of IEEE 2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM) 2016*.
- [15] Haddad D., Waltrip B., Steiner R., Low Noise Programmable Current Source for the NIST-3 and NIST-4 Watt Balance. *Proc. of IEEE 2012 Conference on Precision electromagnetic Measurements*, 2012.
- [16] Chao L., Seifert F., Cao A., Haddad D., Newell D., Schlamminger S., Pratt J., The Design of the New NIST-4 Watt Balance. *Proc. of IEEE 29th Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, 2014.
- [17] Haddad D., Seifert F., Chao L., Possolo A., Newell D., Pratt J., Williams C., Schlamminger S., Measurement of the Planck constant at the National Institute of Standards and Technology from 2015 to 2017. *Metrologia*, vol. 54 (2017), s. 633–641.
- [18] Schlamminger S., Design of the permanent-magnet system for NIST-4. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 62 (2013), s. 1524–1530.
- [19] Schlamminger S., Steiner R., Haddad D., Newell D., Seifert F., Chao L., Liu R., Williams E., Pratt J., A summary of the Planck constant measurements using a watt balance with a superconducting solenoid at NIST. *Metrologia*, vol. 52 (2015), s. L5–L8.
- [20] <https://www.bipm.org/en/bipm/mass/watt-balance/>
- [21] Improved understanding of Kibble balance magnets <https://www.bipm.org/en/news/full-stories/2018-01-kibble.html>



- [22] Li S., Bielsa F., Stock M., Kiss A., Fang H., A permanent magnet system for Kibble balances. *Metrologia*, vol. 54 (2017), s. 775–783.
- [23] Li S., Bielsa F., Stock M., Kiss A., Fang H., Coil-current effect in Kibble balances: analysis, measurement, and optimization. *Metrologia*, vol. 55 (2018), s. 75–83.
- [24] Ahmedov H., Korutlu B., Özgür B., Yaman O., Alignment in UME oscillating-magnet Kibble balance experiment. *UME Reports* 2017.
- [25] Ahmedov H., Babayiğit Aşkın N., Korutlu B., Orhan R., Preliminary Planck constant measurements via UME oscillating magnet Kibble balance. *Metrologia*, vol. 55 (2018), s. 326–333.
- [26] Robinson I., Towards the redefinition of the kilogram: a measurements of the Planck constant using the NPL Mark II watt balance. *Metrologia*, vol. 49 (2012), s. 113–156.
- [27] Davidson S., Robinson I., Lovelock P., Jarvis C., The development of a next-generation Kibble balance for the realization of the unit of mass following the revision of the SI. *Euspen's 18th International Conference & Exhibition*, Venice, June 2018.
- [28] Pinot P., Macé S., Geneves G., Gournay P., Haddad D., Lecollinet M., Villar F., Himbert M., Study of flexure strips made of copper-berilium alloy to be used for French watt balance experiment. *Revue Française de Métrologie* 21 (2010), s. 9–21.
- [29] Thomas M., Ziane D., Pinot P., Karcher R., Imanaliev A., Pereira Dos Santos F., Merlet S., Piquemal F., Espel P., A determination of the Planck constant using the LNE Kibble balance in air. *Metrologia*, vol. 54 (2017), s. 468–480.
- [30] Researchers developing a new balance for the new kilogram. *Technische Universität Ilmenau* (2017) <https://phys.org/news/2017-06-kilogram.html>
- [31] Rothleitner Ch., Schleichert J., Günther L., Vasilyan S., Rogge N., Knopf D., Fröhlich T., Härtig F., The Planck-Balance – a self-calibrating precision balance for industrial applications. *59th ILMENAU SCIENTIFIC COLLOQUIUM*, Technische Universität Ilmenau, 11–15 September 2017.
- [32] Rothleitner C., Schleichert J., Rogge N., Günther L., Vasilyan S., Hilbrunner F., Knopf D., Fröhlich T., Härtig F., The Planck-Balance – using a fixed value of the Planck constant to calibrate E1/E2-weights. *Measurement Science and Technology*, vol. 29 (2018), 074003.
- [33] Günther L., Rothleitner C., Schleichert J., Rogge N., Vasilyan S., Härtig F., Fröhlich T., The Planck-Balance – primary mass metrology for industrial applications. *Journal of Physics: Conf. Series* 1065 (2018) s. 042021-1– 042021-4.
- [34] Collaboration on the design and construction of the next generation of Kibble balances. *National Physical Laboratory*, July 2018.
- [35] Davidson S., Determination of the effect of transfer between vacuum and air on mass standards of platinum-iridium and stainless steel. *Metrologia*, vol. 47 (2010), s. 487–497.
- [36] J. Berry, S. Davidson: Effect of pressure on the sorption correction to stainless steel, platinum/iridium and silicon mass artefacts. *Metrologia*, vol. 51 (2014), s. S107–S113.
- [37] P. Fuchs, K. Marti, S. Russi: Traceability of mass in air to mass in vacuum: results on the correlation between the change in mass and the surface chemical state. *Metrologia*, vol. 51 (2014), s. 376–386.
- [38] Davidson S., Berry J., Abbott P., Marti K., Green R., Malengo A., Nielsen L., Air–vacuum transfer; establishing traceability to the new kilogram. *Metrologia*, vol. 53 (2016), s. A95–A113.
- [39] *Czteroletni strategiczny plan działania GUM 2018–2021*. Wydawnictwo GUM, Warszawa 2017.
- [40] *Współpraca z Przemysłem i Nauką*. Wydawnictwo GUM, Warszawa, 2017.
- [41] *Strategia Rozwoju Kraju 2020*. Ministerstwo Rozwoju Regionalnego, Departament Koordynacji Polityki Strukturalnej. Warszawa 2012.
- [42] *Strategia na rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju do roku 2020 (z perspektywą do 2030 r.)*. Dokument przyjęty uchwałą Rady Ministrów w dniu 14 lutego 2017 r. w Warszawie.
- [43] Pierwszy w Polsce próżniowy komparator masy będzie pracował w GUM. *Artykuł w Biuletynie GUM*, nr 1 (2018), s. 5.