

## Wzorzec długości – w przyszłość z zegarem optycznym?

### Length standard – future with optical clock?

**Adam Żeberkiewicz** (Gabinet Prezesa, GUM)

Z Dariuszem Czulkim, głównym metrologiem w Laboratorium Długości, opiekunem państwowego wzorca długości rozmawiamy o tym, jak zbudowany jest wzorzec długości i jakie możliwości pomiarowe wynikają z posiadania takiego stanowiska. Wywiad dotyczy również porównań międzynarodowych, a także perspektyw związanych z zegarem optycznym, którego budowa stwarza nowe możliwości w zakresie dokładności wzorca.

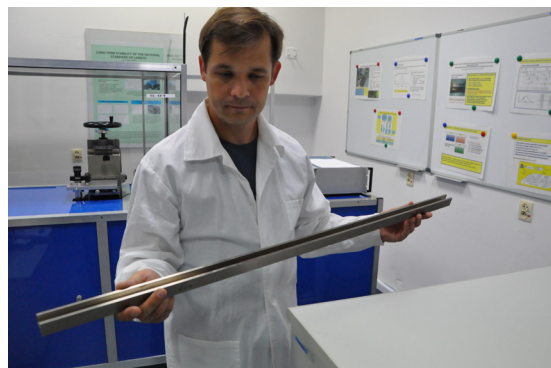
The interview with Dariusz Czulek, metrologist in Length Laboratory, National Length Standard Supervisor. This interview is about structure of length standard and what kind of measure capabilities can be reached due to the National Length Standard. The interlocutors talk about comparisons of length standards and future prospects of optical clock project which can bring more accuracy of length measurements.

#### – Jak zbudowany jest państwowy wzorzec długości?

– Państwowy wzorzec jednostki miary długości składa się z dwóch układów pomiarowych: lasera helowo-neonowego stabilizowanego jodem oraz syntezy częstotliwości optycznych. Oba układy umożliwiają wzorcowanie, z niepewnością względną na poziomie  $10^{-13}$ , stabilizowanych laserów metrologicznych, które emitują promieniowanie laserowe o długościach fal w granicach od 532 nm do 1064 nm.

#### – Co to oznacza? Jak duże są możliwości pomiarowe?

– Do 2007 roku Laboratorium Długości posiadało jedynie laser helowo-neonowy stabilizowany jodem, który umożliwiał wzorcowanie tylko laserów, emitujących promieniowanie o długości fali odpowiadającej barwie czerwonej (w przybliżeniu 633 nm). W celu zapewnienia spójności pomiarowej lasery emitujące inną długość fali, na przykład o barwie zielonej (543 nm), wykorzystywane w Laboratorium Długości, wzorcowane były poza granicami kraju. Zakup syntezy częstotliwości optycznych rozszerzył zakres pomiarowy i tym samym umożliwił wzorcowanie stabilizowanych laserów metrologicznych emitujących promieniowanie o barwie np. zielonej, pomarańczowej, żółtej. Wzorcowanie lasera za gra-



Państwowy wzorzec jednostki miary długości 1 m, stosowany w GUM w latach 1927–1944

nicą trwało około pół roku, a stanowisko pomiarowe, na którym był wykorzystywany, musiało być w tym czasie wyłączone z eksploatacji. Zakup syntezy częstotliwości optycznych skrócił czas wzorcowania oraz pozwolił na obniżenie kosztów wzorcowania.

#### – Jak wygląda piramida spójności w przypadku jednostki miary długości?

– Na szczycie piramidy jest państwowy wzorzec jednostki miary długości – syntezer częstotliwości optycznych – umożliwiający realizację jednostki długości na najwyższym światowym poziomie. Za pomocą syntezy wzorcowane są z kolei stabilizowane

lasery metrologiczne oraz głowice interferometrów laserowych. Wyznaczana jest częstotliwość promieniowania lasera oraz długość fali promieniowania w próżni. Przyrządy te są wykorzystywane jako wzorce odniesienia na stanowiskach pomiarowych, służących do wzorcowania m.in. płytek wzorcowych, dalmierzy, wzorców kreskowych, przymiarów.

**– Czy właśnie te przyrządy, które Pan wymienił, są najczęściej dostarczane przez klientów do wzorcowania?**

– Tak, zdecydowanie tak. Najpopularniejsze są materialne wzorce długości – płytki wzorcowe – powszechnie stosowane w laboratoriach pomiarowych, jako wzorce odniesienia, do wzorcowania takich przyrządów pomiarowych użytkowych jak suwmiarki, mikrometry, czujniki pomiarowe. Obecnie znacznie wzrosła liczba wzorcowanych dalmierzy laserowych, chętnie stosowanych ze względu na łatwość oraz szybkość przeprowadzenia pomiaru. Duży odsetek zgłaszanych przyrządów pomiarowych stanowią wzorce kreskowe, powszechnie używane jako wzorce odniesienia podczas wzorcowania mikroskopów, projektorów, długościomierzy i maszyn pomiarowych.

**– Czyli z tradycyjnymi przyrządami do mierzenia w GUM już właściwie się nie stykamy?**

– Raczej nie. Wykonujemy jedynie wzorcowania przyrządów pomiarowych, które są wzorcami odniesienia w laboratoriach pomiarowych.

**– Ze szkolną linijką już nikt nie przyjdzie...**

– Do Głównego Urzędu Miar nie. Tego rodzaju pomiary zostały przekazane do laboratoriów terenowej administracji miar. Tego typu wzorcowania wykonują też laboratoria przemysłowe.

**– Jaka jest wartość materialna naszego wzorca?**

– Wartość syntezeru częstotliwości optycznych wynosi ok. 1,200 tys. zł. Natomiast laser helowo-neonowy stabilizowany jodem został zakupiony w 1991 roku za sumę 130 tys. zł. Obecnie cena takiego lasera wynosi ok. 200–300 tys. zł. Tak więc wartość całego państwowego wzorca jednostki długości to ok. 1,5 mln zł. To wprawdzie dużo pieniędzy, ale posia-

dając własny wzorec jesteśmy niezależni i mamy zapewnioną w kraju spójność pomiarową w dziedzinie długości.

**– Niestety nie zawsze potrafimy przedstawić na szerszym forum społecznym te korzyści. Co zatem przeciętny Kowalski ma z tego, że Polska posiada własny państwowy wzorec długości?**

– Przede wszystkim oznacza to prestiż dla kraju, a także dzięki możliwości zapewnienia spójności pomiarowej, niezależność od wzorcowań w innych krajach. Pozwala to na spełnienie oczekiwań m.in. wojskowych laboratoriów metrologicznych, które sukcesywnie zgłaszają do wzorcowania wzorce odniesienia w postaci głowic interferometrów laserowych oraz płytek wzorcowych.

**– Jakie koszty generuje utrzymanie wzorca? Mam na myśli zabiegi pielęgnacyjne, czyszczenie, wymiana zużytych elementów.**

– Utrzymanie wzorca generuje minimalne koszty mieszczące się w zakresie zakupów bieżących. Ewentualna awaria któregoś z elementów układu wywołałaby dużo większe koszty, rzędu nawet do kilkuset tysięcy złotych.

**– Ale jak dotąd nic poważnego się nie stało?**

– Wymienialiśmy jedynie drobne elementy.

**– A co z czyszczeniem?**

– Jest dużo elementów optycznych. Czyści się je więc z kurzu spirytusem bądź acetonem. W pomieszczeniu, w którym znajduje się państwowy wzorec jednostki długości, musi panować szczególna czystość. Zatem wchodząc tam, trzeba być ubranym w fartuch oraz mieć specjalne obuwie laboratoryjne. Wzorec dodatkowo jest osłonięty obudową w celu ochrony przed kurzem. Każda drobinka kurzu może spowodować, że wiązki laserowe zostaną rozjustowane, a tym samym spowodują nieprawidłową pracę wzorca. Konserwacja polega więc głównie na czyszczeniu elementów optycznych.

**– Powiedzmy też coś o odpowiednich warunkach, wymaganych dla przechowywania wzorca.**

– Wzorzec jest bardzo czuły na efekty termiczne i drgania. Dlatego też przechowywany jest w klimatyzowanym pomieszczeniu z kontrolowaną temperaturą i wilgotnością oraz znajduje się na płycie granitowej z układem wibroizolacyjnym.

– **Do przypisanych wzorcowi warunków pracy zaliczamy też określoną temperaturę i wilgotność...**

– Wzorzec państwowy jest przechowywany w temperaturze  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$  oraz wilgotności względnej  $(50 \pm 10)\%$ . Jednocześnie, jeśli chodzi o pomiary przyrządów pomiarowych w dziedzinie długości, to wyniki odnosi się do temperatury odniesienia  $20^\circ\text{C}$ .

– **Ile państw posiada własny państwowy wzorzec długości?**

– Trudno powiedzieć. W Europie chyba nie wszystkie. Większość krajów będących w posiadaniu państwowego wzorca długości, ma również laser helowo-neonowy stabilizowany jodem, a niektóre z nich dodatkowo syntezer częstotliwości optycznych. W tej

chwili, tak jak wspomniałem, syntezer częstotliwości to najlepsze stanowisko do realizacji jednostki miary długości. Nad układem pomiarowym pracował niemiecki fizyk Theodor W. Hänsch, który otrzymał w 2005 r. Nagrodę Nobla za wkład w rozwój precyzyjnej spektroskopii laserowej. Był na przykład głównym autorem pomysłu pomiaru częstotliwości z wykorzystaniem syntezer częstotliwości optycznych.

– **Czy ten sposób realizacji jest również w innych państwach?**

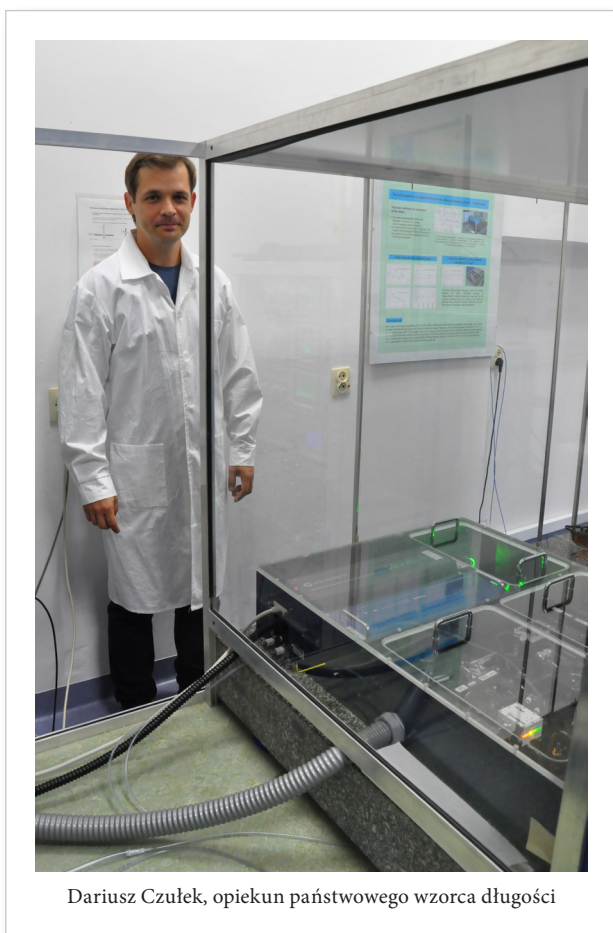
– Tak. Zgodnie z zaleceniem Międzynarodowej Konferencji Miar, jednym ze sposobów realizacji jednostki długości jest wykorzystanie lasera helowo-neonowego stabilizowanego jodem lub syntezer częstotliwości optycznych. Kraje posiadające syntezer częstotliwości optycznych, tak jak Polska, reprezentują najwyższy poziom realizacji jednostki długości. Wiem, że z krajów bliskich nam geograficznie, takie rozwiązanie wykorzystują również Czechy, Finlandia, Niemcy. Poza tym oczywiście Anglicy, Francuzi, Austriacy, Szwajcarzy.

– **Czy ten najwyższy poziom osiągamy również podczas porównań międzynarodowych, w których uczestniczymy?**

– Tak. Kluczowe porównania międzynarodowe odbywają się w oparciu o lasery helowo-neonowe stabilizowane jodem. Częstotliwość oraz stabilność promieniowania optycznego lasera należącego do GUM zostały wyznaczone podczas takich porównań. Ostatnie porównania odbyły się w latach 2007–2009. W 2008 roku zorganizowano pilotażowe porównania trzech syntezerów optycznych, z udziałem BEV (Austria) oraz ČMI (Czechy), zakończone sukcesem. Jednak proces porównań międzynarodowych w oparciu o syntezery częstotliwości optycznych nadal nie jest jeszcze sformalizowany. Są to urządzenia mało mobilne ze względu na duże gabaryty.

– **Jak często odbywają się porównania?**

– Porównania międzynarodowe laserów stabilizowanych jodem powinny się odbywać raz na osiem lat. Poprzednio porównania były organizowane przez BIPM, a obecnie ich organizację przejęły dwa kraje: Austria i Finlandia. Ostatnie kluczowe porównania



Dariusz Czulek, opiekun państwowego wzorca długości

DECYZJA NR 7

Prezesa Polskiego Komitetu Normalizacji, Miar i Jakości  
z dnia 15 marca 1980 r.  
w sprawie ustalenia etalonu państwowego jednostki długości

Na podstawie art. 4, ust. 2 ustawy z dnia 17 czerwca 1966 r. o miarach i narzędziach pomiarowych (Dz. U. z 1966 r. nr 23, poz. 148 i z 1972 r. nr 11, poz. 83) postanawia się, co następuje:

- § 1. Jako etalon państwowy jednostki długości — metr (m), zwany dalej etalonem, ustala się stanowisko interferencyjne z lampą Kr 86, zestaw końcowych wzorców długości o wartościach nominalnych od 0,5 mm do 1000 mm, wzorzec kreskowy o wartości nominalnej 1 m oraz narzędzia pomiarowe i urządzenia pomiarowe pomocnicze.
- § 2. Charakterystykę techniczną i metrologiczną etalonu podaje świadectwo, wystawione przez Laboratorium Wzorców Długości Zakładu Metrologicznego Długości i Kąta Polskiego Komitetu Normalizacji, Miar i Jakości, na podstawie niniejszej decyzji.
- § 3. Etalon przechowywany jest w Laboratorium Wzorców Długości i Kąta Polskiego Komitetu Normalizacji, Miar i Jakości, zgodnie z instrukcją o jego przechowywaniu i stosowaniu.
- § 4. Decyzja niniejsza obowiązuje od dnia podpisania.

Prezes  
Polskiego Komitetu Normalizacji, Miar i Jakości



wz. T. Podgórski

międzynarodowe laserów helowo-neonowych odbyły się w Finlandii (MIKES). Porównania polegały na porównaniu wskazań lasera należącego do GUM ze wskazaniami syntezy częstotliwości należącego do MIKES. W wyniku tych porównań wyznaczono częstotliwość oraz stabilność promieniowania naszego lasera, które potwierdziły zdolności pomiarowe laboratorium. Wyniki te służą jako wartość odniesienia dla wykonywanych wzorcowań na stanowisku państwowego wzorca jednostki długości. Kolejne porównania są zaplanowane na ten rok.

– *Wyniki będą zapewne w przyszłym roku?*

– Tak, dzieje się to dość szybko. Porównania laserów helowo-neonowych stabilizowanych jodem są ciągłymi porównaniami, tzw. ongoing comparison, do których zainteresowany kraj może przystąpić w każdej chwili.

– *Sposób realizacji wzorca długości przez lata zmieniał się. Z czego to wynikało?*

– Z rosnącego zapotrzebowania na coraz dokładniejsze pomiary. Spowodowane to było postępowaniem technicznym. Państwowy wzorzec jednostki miary długości w GUM został ustanowiony w 1980 roku. Jednostka długości realizowana była, na podstawie

definicji metra, ustanowionej przez XI Generalną Konferencję Miar w 1960 roku, poprzez wykorzystanie długości fal w próżni promieniowania emitowanego przez atom Kr 86. W skład wzorca wchodziło kilka elementów. Zasadniczą jego część tworzyło stanowisko interferencyjne z lampą Kr 86, zestaw końcowych wzorców długości o wartościach nominalnych od 0,5 mm do 1000 mm, wzorzec kreskowy o wartości nominalnej 1 m.

W 1983 roku na XVII Generalnej Konferencji Miar określono metr jako długość drogi przebytej w próżni przez światło w czasie  $1/299\,792\,458$  sekundy, a Międzynarodowy Komitet Miar ustalił rozszerzoną listę źródeł promieniowania laserowego, zalecanych do praktycznej realizacji (mise en pratique) nowej definicji. Od 1999 roku jednostka długości jest realizowana za pomocą lasera helowo-neonowego stabilizowanego jodem, który jest jednym ze stabilnych źródeł promieniowania z listy zalecanej przez Międzynarodowy Komitet Miar. Stabilizowany laser helowo-neonowy został zakupiony przez GUM w 1991 roku, a w 1999 roku Prezes GUM ustanowił go państwowym wzorcem jednostki długości (aktualna decyzja dla wzorca została wydana 24 kwietnia 2003 roku). Od 2008 roku jednostka długości jest realizowana również, wykorzystując syntezy częstotliwości optycznych.

**– Czy wcześniejszy sposób wyznaczania nie był wystarczająco dokładny?**

– Nie był. Zmiana definicji, a co za tym idzie sposobu realizacji jednostki długości spowodowała zmniejszenie niepewności względnej pomiaru z  $10^{-8}$  do  $10^{-11}$ . Zmniejszenie niepewności pomiaru na szczycie piramidy spójności pomiarowej spowodowało zmniejszenie niepewności pomiaru podczas wykonywania wzorcowań przyrządów do pomiaru długości.

**– Czy można się spodziewać, że w najbliższym czasie pojawi się jeszcze inny sposób realizacji?**

– Sposób realizacji nie. Aktualnie na świecie trwają prace nad budową i wykorzystaniem optycznego zegara atomowego przy realizacji jednostki długości. W ubiegłym roku powstał w Polsce pierwszy optyczny zegar atomowy. Stworzony został przez trzy polskie uczelnie: Uniwersytet Warszawski, Uniwersytet Jagielloński w Krakowie, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu.

**– Czy wykorzystanie zegara optycznego będzie kosztowniejsze?**

– Na pewno tak, ale dokładnych liczb nie jestem w stanie podać. Jednym z trzech elementów zegara optycznego jest syntezer częstotliwości optycznych. Tak więc można się spodziewać, że koszt będzie ok. trzy razy wyższy niż obecnie.

**– Czyli nie każde państwo będzie na taki zegar stać?**

– Myślę, że nie. W chwili obecnej takie zegary posiadają jedynie cztery kraje: USA, Niemcy, Japonia, Francja. Jednak nie są one wykorzystywane podczas realizacji jednostki długości. Na pewno te bogatsze, bardziej zaawansowane technologicznie kraje będą to miały.

**– Czyli w przyszłości sposób realizacji będzie taki sam, ale wejdzie on na wyższy, dokładniejszy poziom?**

– Tak. Zastosowanie zegara optycznego umożliwiłoby uzyskanie wyższej stabilności państwowego wzorca jednostki długości. Obecnie nie ma takich potrzeb, ponieważ uzyskiwana w tej chwili stabilność jest wystarczająca dla potrzeb gospodarki.

**– Laboratoria Głównego Urzędu Miar uczestniczą w różnych programach metrologicznych. Co możemy powiedzieć o pracach badawczych realizowanych przez Laboratorium Długości w oparciu o państwowy wzorzec jednostki długości?**

– Aktualnie pracujemy nad zwiększeniem zakresu pomiarowego państwowego wzorca jednostki długości. Teraz umożliwia to wzorcowanie laserów emitujących promieniowanie o długości fali do ok.  $1 \mu\text{m}$ . Powstaje zatem problem z zachowaniem spójności pomiarowej, kiedy chodzi o lasery wykorzystywane w telekomunikacji, emitujące promieniowanie o długości fali ok.  $1,5 \mu\text{m}$ . Pracujemy nad tym, żeby zakres naszego wzorca rozszerzyć i zapewnić tym samym spójność pomiarową dla tego typu laserów.

Ponadto bierzemy udział w projekcie EMRP IND53 „Large Volume Metrology in Industry”. To praca oparta w 50. procentach na państwowym wzorcu jednostki długości. Syntezer częstotliwości optycznych jest stanowiskiem pomiarowym docelowo zaprojektowanym do wyznaczania częstotliwości promieniowania wzorcowanego lasera metrologicznego. Naszym zadaniem jest m.in. wykorzystanie go do bezwzględного pomiaru odległości oraz współczynnika załamania światła w powietrzu. Kolejnym etapem będzie wykorzystanie nowego układu pomiarowego do bezdotykowego pomiaru płytek wzorcowych metodą interferencyjną.

**– Dziękuję za rozmowę i życzę powodzenia w realizacji wymienionych projektów.**