

Analiza niepewności pomiaru przy wzorcowaniu płytek wzorcowych różnymi metodami

Evaluation of the uncertainty of measurement in gauge blocks calibration by different methods

JUSTYNA NIEDZIELA
MARTA RĘPAŁSKA
GRZEGORZ ZAMIELA*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.11.458

Prezentowano procedurę analizy wyników wzorcowania różnymi metodami płytek wzorcowych za pomocą komparatora dwuczujnikowego. Zweryfikowano spójność wyników wzorcowania metodą porównawczą z pomiarami bezpośrednimi oraz potwierdzono niepewność pomiaru deklarowaną przez producenta komparatora.

SŁOWA KLUCZOWE: płytki wzorcowe, wzorcowanie, niepewność pomiaru

Analysis of gauge block calibration results performed by different methods is presented. The coherence of gauge blocks calibration by comparative and direct measurement was verified. The uncertainty of measurement specified by comparator vendor was validated

KEYWORDS: gauge blocks, calibration, uncertainty

W zakresie działalności Centralnego Wojskowego Ośrodka Metrologii (CWOM) jest utrzymywanie wzorców pomiarowych odniesienia resortu obrony narodowej. Zadanie to realizuje Zespół Wzorców Odniesienia (ZWO).

W dziedzinie pomiarów długości wzorcami pomiarowymi odniesienia są dwa komplety stalowych płytek wzorcowych Mitutoyo klasy K, o długościach nominalnych od 0,5 mm do 500 mm. Spójność pomiarowa wzorców pomiarowych odniesienia CWOM w zakresie długości środkowej jest zapewniona poprzez ich wzorcowanie metodą interferencyjną w Głównym Urzędzie Miar (GUM). Zdolność pomiarowa (CMC) GUM podana jest w bazie danych porównań kluczowych BIPM (KCDB) [5].

Płytki wzorcowe występują zazwyczaj w kompletach o ściśle zdefiniowanych wymiarach, w zależności od wielkości kompletu. Jednak występują również komplety płytek wzorcowych przeznaczone do konkretnych zastosowań, np. do wzorcowania mikrometrów czy suwmiarek. Komplety te składają się z płytek wzorcowych o nominalach niewystępujących standardowo. Z tego powodu, aby zapewnić przeniesienie jednostki miary, niezbędna jest możliwość wzorcowania płytek wzorcowych o długościach nominalnych różnych od długości nominalnych posiadanych wzorców pomiarowych odniesienia. W CWOM przeniesienie jednostki miary długości z wzorców pomiarowych odniesienia odbywa się z użyciem komparatora dwuczujnikowego TESA UPD, który umożliwia wzorcowanie płytek wzorcowych zarówno o tej samej, jak i o innej długości nominalnej.

Metody wzorcowania płytek wzorcowych

Płytki wzorcowe są najdokładniejszymi materialnymi wzorcami długości i są szeroko stosowane od wielu lat zarówno w laboratoriach metrologicznych, jak i w przemyśle [4]. Wymagania konstrukcyjne i metrologiczne wobec

płytek wzorcowych zostały opisane w normie PN-EN ISO 3650:2000 [9], gdzie podano również metody wzorcowania płytek oraz zasady zapewnienia ich spójności pomiarowej. Długość płytki wzorcowej jest spójna z państwowymi lub międzynarodowymi wzorcami długości, jeżeli wynik pomiaru można powiązać z płytką wzorcową, której wzorcowanie wykonano metodą interferencyjną, za pomocą odpowiednich wzorcowych długości fali [9]. Norma opisuje dwie metody wzorcowania płytek: interferencyjną i porównawczą.

Podstawową metodą wzorcowania płytek jest metoda interferencyjna, pozwalająca na przeniesienie jednostki miary długości z państwowego wzorca jednostki miary długości za pośrednictwem wzorców falowych. Metoda interferencyjna stosowana jest głównie do wzorcowania płytek o najwyższej dokładności (klasy K), używanych wyłącznie do wzorcowania innych płytek wzorcowych metodą porównawczą [4]. W niektórych warunkach wzorcowania płytek wzorcowych metodą porównawczą uzyskuje się nawet mniejszą niepewność niż w przypadku wzorcowania metodą interferencyjną [4].

Ponieważ metoda interferencyjna jest bardzo czasochłonna i kosztowna, większość płytek wzorcowych jest wzorcowana metodą porównawczą. Ponadto niektóre narodowe instytucje metrologiczne nie mają możliwości realizacji metody interferencyjnej i stosują wyłącznie metodę porównawczą [7].

W metodzie porównawczej jednostka miary długości przenoszona jest bezpośrednio z płytek wzorcowych odniesienia na kalibrowane płytki wzorcowe, zazwyczaj o niższej klasie dokładności. Wyznaczana jest różnica długości środkowych płytki wzorcowej odniesienia i płytki wzorcowanej za pomocą komparatorów dwuczujnikowych o wysokiej rozdzielczości, ustawionych osiowo, prostopadłe do powierzchni pomiarowych płytek wzorcowych [9]. Długość środkowa l_c lub odchyłka długości środkowej od długości nominalnej płytki wzorcowej Δl_c są podstawowymi parametrami wyznaczanymi podczas wzorcowania metodą porównawczą. Metoda porównawcza wzorcowania płytek wzorcowych jest szeroko rozpowszechniona w laboratoriach wzorcujących, a sposoby wyznaczania długości środkowej płytek wzorcowych oraz niepewności tych pomiarów są często omawiane w literaturze [6–8, 10]. Pomiaru tego rodzaju zostały przedstawione również w przykładach szacowania niepewności w publikacjach [2 i 3].

We wszystkich przywołanych opracowaniach zakładano, że w metodzie porównawczej płytka wzorcową odniesienia i płytka kalibrowana mają te same długości nominalne. Założenie takie jest uzasadnione, gdyż większość komparatorów długości stosowanych do wzorcowania płytek wzorcowych ma zakres pomiarowy rzędu kilkuset mikrometrów, co pozwala na wzorcowanie tylko płytek wzorcowych o jednakowych długościach nominalnych. Założenie to zostało również przyjęte w dokumencie [1] opisującym proces wzorcowania komparatorów długości. Dokument ten przedstawia niepewność pomiaru, jaką

* Mgr inż. Justyna Niedziela (justekn@o2.pl), mgr inż. Marta Rępałska (marta_repalska@o2.pl), dr inż. Grzegorz Zamiela (g.zamiela@metrologia.wp.mil.pl) – Centralny Wojskowy Ośrodek Metrologii

należy przyjąć dla wzorcowanego komparatora długości przy spełnieniu wymagań dotyczących niepewności zastosowanych wzorców. Ponadto podana wartość niepewności, pochodząca od komparatora, może być stosowana tylko pod warunkiem, że różnica długości wzorcowanych płytek wzorcowych jest mniejsza niż 10 μm .

Komparator TESA UPD

Do wzorcowania płytek wzorcowych w ZWO CWOM używany jest dwuczujnikowy komparator TESA UPD, wyposażony w interferencyjne czujniki inkrementalne z siatką fazową. Górny czujnik komparatora ma zakres pomiarowy 25 mm, dzięki czemu urządzenie można stosować nie tylko do wzorcowania płytek wzorcowych metodą porównawczą (dla jednakowych długości nominalnych płytki odniesienia i płytki kalibrowanej), ale również do wykonywania pomiarów bezpośrednich [11]. Pomiar bezpośredni polega na odniesieniu mierzonej długości środkowej wzorcowanej płytki wzorcowej bezpośrednio do wskazań komparatora. Realizacja takiego pomiaru wymaga jednak wcześniejszego odniesienia wskazań komparatora do dwóch płytek wzorcowych odniesienia o różnych długościach nominalnych. Jest to tzw. ustawienie wyświetlacza. Po tej operacji dla danego ustawienia komparatora możliwe jest wzorcowanie płytek wzorcowych w całym zakresie pomiarowym górnego czujnika komparatora.

Producent komparatora specyfikuje niepewność rozszerzoną pomiaru bezpośredniego płytek wzorcowych stałowych (dla prawdopodobieństwa rozszerzenia ok. 95%) z użyciem komparatora TESA UPD równą:

$$U = (0,05 + 0,5 \cdot L_1) \mu\text{m} \quad (1)$$

gdzie: L_1 – długość nominalna płytki wzorcowej wyrażona w metrach.

Warunkiem uzyskania deklarowanej niepewności jest zastosowanie do wzorcowania komparatora wzorców o niepewności $U \leq 0,015 \mu\text{m}$, a podczas wzorcowania płytek wzorcowych – korzystanie z wzorców odniesienia o niepewności $U \leq (0,02 + 0,2 \cdot L_1) \mu\text{m}$ [11].

Zaletą pomiaru bezpośredniego jest możliwość wzorcowania płytek o innych długościach nominalnych niż długości płytek wzorcowych odniesienia. Ponadto metoda ta skraca czas wzorcowania całego kompletu płytek. W metodzie pomiarów bezpośrednich zastosowanie tylko dwóch płytek wzorcowych odniesienia pozwala na wywzorcowanie wszystkich płytek wzorcowych, których różnica długości nominalnych nie przekracza 25 mm. Przykładowo: dla dużego kompletu płytek wzorcowych składającego się ze 122 szt. na ustawieniu wyświetlacza za pomocą dwóch płytek wzorcowych odniesienia możliwe jest wywzorcowanie 113 płytek wzorcowych z zakresu 0,5–25 mm. Natomiast do wywzorcowania całego kompletu wystarczy tylko 5 szt. płytek wzorcowych odniesienia. Pozwala to na znaczne ograniczenie kosztów zakupu oraz utrzymania wzorców.

Badania eksperymentalne

Przedmiotem badań była ocena spójności wyników wzorcowania płytek wzorcowych metodą porównawczą z wynikami wzorcowania metodą bezpośrednią. Dodatkowo zweryfikowano niepewność deklarowaną przez producenta, opisaną zależnością (1). Do oceny spójności wyników pomiarów zastosowano liczbę $|E_n|$:

$$|E_n| = \left| \frac{x - X_{ref}}{\sqrt{U_x^2 + U_{ref}^2}} \right| \quad (2)$$

gdzie: x – wartość wielkości mierzonej; X_{ref} – wartość odniesienia; U_x – niepewność rozszerzona wartości wielkości mierzonej; U_{ref} – niepewność rozszerzona wartości odniesienia.

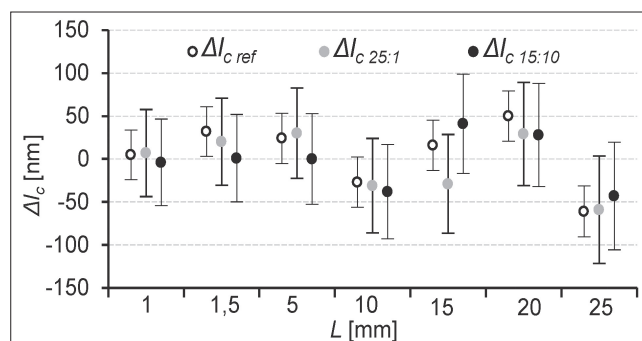
Liczba $|E_n|$ jest parametrem stosowanym do porównań międzylaboratoryjnych i badań biegłości. Pomiaru uznaje się za spójne, jeżeli $|E_n| \leq 1$.

Pierwsze badanie polegało na wykonaniu wzorcowania siedmiu płytek wzorcowych klasy K metodą bezpośrednią. Wybrano płytki wzorcowe wzorcowane w GUM metodą interferencyjną. Pozwalały one na realizację pomiarów w całym zakresie pomiarowym górnego czujnika komparatora. Wartościami odniesienia w tym badaniu były wartości odchyłek długości środkowych od długości nominalnych płytek wzorcowych ($\Delta l_{c, ref}$) wyznaczone w GUM. Niepewność rozszerzona wartości odniesienia (dla prawdopodobieństwa rozszerzenia ok. 95%) została określona w świadectwie wzorcowania GUM zależnością:

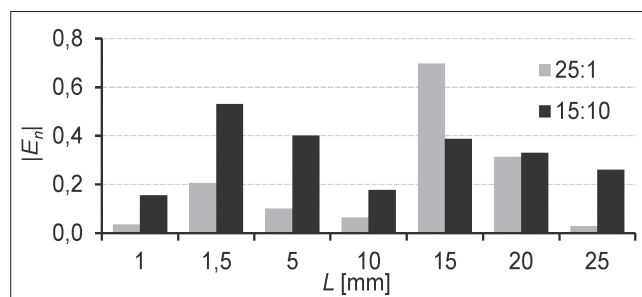
$$U = \sqrt{29^2 + 0,2^2 \cdot L^2} \text{ nm} \quad (3)$$

gdzie: L – długość nominalna płytki wzorcowej wyrażona w mm.

Mierzono wartości odchyłek długości środkowych płytek wzorcowych od długości nominalnych tych płytek (Δl_c). Pomiaru wykonywano dla dwóch różnych zestawów płytek wzorcowych stosowanych do ustawienia wyświetlacza komparatora: 25 mm i 1 mm ($\Delta l_{c, 25:1}$) oraz 15 mm i 10 mm ($\Delta l_{c, 15:10}$). Niepewność rozszerzona wartości mierzonej została wyrażona zależnością (1). Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 1, a odpowiadające im wartości liczb $|E_n|$ na rys. 2.



Rys. 1. Odchyłki długości środkowych od długości nominalnych wraz z niepewnością rozszerzoną płytek wzorcowych klasy K wyznaczone w GUM ($\Delta l_{c, ref}$) oraz z pomiarów przy różnych ustawieniach wyświetlacza ($\Delta l_{c, 25:1}$, $\Delta l_{c, 15:10}$)

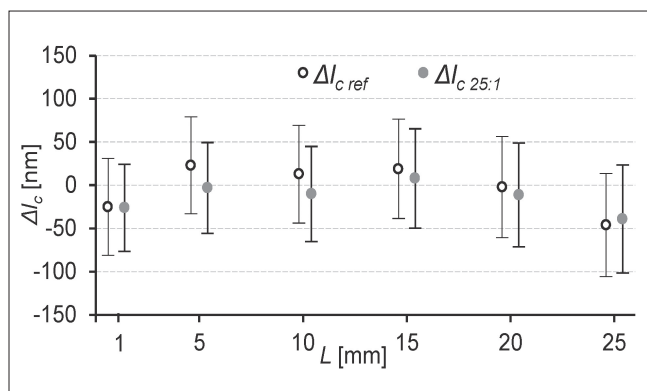


Rys. 2. Wartości liczby $|E_n|$ wyznaczone dla danych przedstawionych na rys. 1

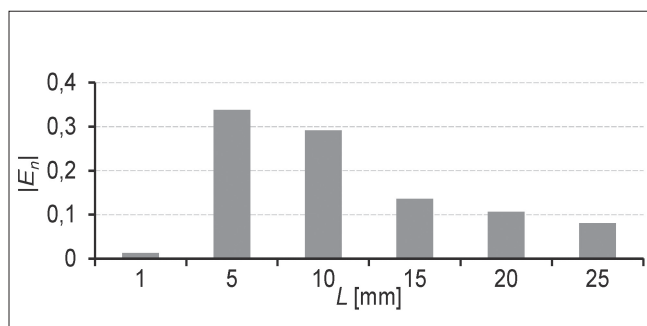
Wyniki i ich niepewności uzyskane dla wszystkich pomiarów pozwoliły na pozytywną ocenę spójności tych wyników z wynikami uzyskanymi w GUM metodą interferencyjną.

Następnie wykonano wzorcowanie sześciu płytek wzorcowych klasy 0 metodą bezpośrednią i metodą porównawczą. Wybrane płytki wzorcowe pozwalały na realizację pomiarów w całym zakresie pomiarowym górnego czujnika komparatora. Wartościami odniesienia w tym badaniu były odchyłki długości środkowych płytek wzorcowych od długości nominalnych tych płytek ($\Delta l_{c\ ref}$) uzyskane z pomiarów metodą porównawczą. Niepewność rozszerzona wartości odniesienia (dla prawdopodobieństwa rozszerzenia ok. 95%) została określona na podstawie budżetu niepewności wzorcowania płytek wzorcowych metodą porównawczą opracowanego w ZWO CWOM. Niepewność ta jest wyrażana zależnością [12]:

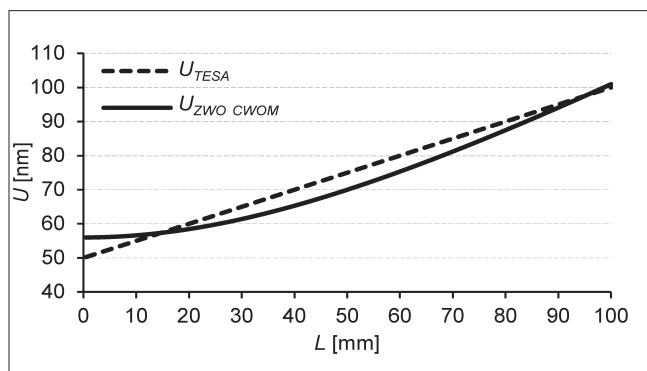
$$U = \sqrt{56^2 + 0,84^2 \cdot L^2} \text{ nm} \quad (4)$$



Rys. 3. Odchyłki długości środkowych od długości nominalnych wraz z niepewnością rozszerzoną płytek wzorcowych klasy 0 uzyskane metodą porównawczą ($\Delta l_{c\ ref}$) oraz metodą bezpośrednią ($\Delta l_{c\ 25:1}$)



Rys. 4. Wartości liczby $|E_n|$ wyznaczone dla danych przedstawionych na rys. 3



Rys. 5. Wartości niepewności rozszerzonych uzyskane z zależności (1) i (4)

Mierzono wartości odchyłek długości środkowych płytek wzorcowych od długości nominalnych tych płytek ($\Delta l_{c\ 25:1}$). Pomiary były wykonywane dla jednej pary płytek wzorcowych stosowanych do ustawienia wyświetlacza komparatora: 25 mm i 1 mm. Niepewność rozszerzona wartości mierzonych wyrażona została zależnością (1). Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 3, a odpowiadające im wartości liczb $|E_n|$ na rys. 4.

W tym badaniu wyniki pomiarów uzyskane różnymi metodami również były spójne.

Niepewności pomiaru wyznaczone z zależności (1) i (4) są zbliżone. Jednakże w zakresie poniżej 15 mm długości nominalnej płytek wzorcowych niepewność pomiarów bezpośrednich podawana przez producenta komparatora jest mniejsza (rys. 5), co sugeruje, że możliwe jest zmniejszenie niepewności oszacowanej w CWOM dla metody porównawczej.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdziły spójność wyników wzorcowania płytek wzorcowych metodą porównawczą i bezpośrednią. Pozwala to na wzorcowanie płytek wzorcowych o długościach nominalnych różnych od długości nominalnych z zastosowaniem niepewności pomiaru długości środkowej płytek wzorcowych deklarowanej przez producenta komparatora. Wykorzystanie metody bezpośredniej pozwala znacznie ograniczyć liczbę płytek wzorcowych odniesienia wymaganych do przekazania jednostki miary długości.

W zakresie długości nominalnej płytek wzorcowych poniżej 15 mm niepewność pomiaru bezpośredniego deklarowana przez producenta jest mniejsza od niepewności oszacowanej w ZWO dla pomiarów porównawczych. Wskazuje to na możliwość zmniejszenia oszacowanej w ZWO CWOM niepewności pomiaru, jednakże konieczna byłaby szczegółowa analiza opracowanego budżetu niepewności.

LITERATURA

1. Calibration Guide EURAMET cg-2 version 2.0 (03/2011) Calibration of gauge block comparators.
2. JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 2008.
3. EA-4/02 M: 2013 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration.
4. Bonsch G. "Gauge blocks as length standards measured by interferometry or comparison: length definition, traceability chain and limitations". *Proc. of SPIE*. Vol. 3477 (1998): pp. 199–210.
5. http://kcdb.bipm.org/AppendixC/country_list_search.asp?CountSelected=PL&sservice=L/DimMet.2.2 (dostęp: 25.02.2016 r.).
6. Thalmann R., Baechler H. "Issues and advantages of gauge block calibration by mechanical comparison". *Proc. of SPIE*. Vol. 5190 (2003): pp. 62–69.
7. Godina A., Acko B. "Measurement uncertainty analysis for calibration of gauge blocks". *Procedia Engineering*. Vol. 69 (2014): pp. 191–198.
8. Decker J.E., Schodel R., Bonsch G. "Overview of uncertainty analyses for gauge block calibration". *ASPE Proceedings, Uncertainty Analysis in Measurement and Design* (2004).
9. PN-EN ISO 3650:2000 – Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Wzorce długości, Płytki wzorcowe.
10. Decker J.E., Pekelsky J.R. "Uncertainty of gauge block calibration by mechanical comparison: a worked example. Case 1: gauges of like material". *NRC 39998* (1996).
11. Urządzenie do pomiaru płytek wzorcowych UPD UPC. Instrukcja obsługi 5910.012.0110. TESA, wyd. 1.
12. PP-06.01.01-2-2015-CWOM-PL_WZ_MET, wyd. 2, „Kalibracja płytek wzorcowych metrycznych przy pomocy komparatorów długości TESA UPD i EMP II”.