

**Robert SZUMSKI**

GŁÓWNY URZĄD MIAR, ZAKŁAD DŁUGOŚCI I KĄTA,  
ul. Elekoralna 2, 00-139 Warszawa

## Niepewność pomiaru długich płytek wzorcowych na zmodernizowanym komparatorze interferencyjnym

Mgr inż. Robert SZUMSKI

Doktorant w Instytucie Mikromechaniki i Fotoniki Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej na specjalności Elektromechatronika. Od 2003 roku pracownik Zakładu Długości i Kąta Głównego Urzędu Miar. Specjalizuje się w interferencyjnych pomiarach parametrów wzorców długości. Główne zainteresowania to rozwój wzorców i metod dotyczących pomiarów częstotliwości optycznych i wielkości geometrycznych metodami interferencyjnymi.



e-mail: robert.szumski@wp.pl

### Streszczenie

Dla zmodernizowanego komparatora interferencyjnego do wzorcowania długich płytek wzorcowych o długości do 500 mm została oszacowana niepewność pomiaru. Stanowisko umożliwia wykonywanie pomiarów metodą opartą na detekcji końców płytki mierzonej z wykorzystaniem efektu interferencji w świetle białym i pomiarze przemieszczenia zwierciadła odniesienia interferometrem laserowym, która została uzupełniona o dokładniejszą metodę reszt ułamkowych opartą na dwóch stabilizowanych laserach He-Ne. Przedstawiona została analiza równania pomiaru i źródeł niepewności pomiaru dla obu metod, wraz z budżetem niepewności.

**Słowa kluczowe:** długie płytki wzorcowe, interferencja, światło białe, metoda reszt ułamkowych, niepewność pomiaru.

### The uncertainty of measurement of long gauge blocks with a modernized interferometric comparator

#### Abstract

The measurement uncertainty for a modernized gauge block interferometer for long gauge blocks up to 500 mm, used in the Length Laboratory of Length and Angle Division of GUM, was evaluated. After modernization the measurement of gauge blocks with the modernized set-up may be carried out using the method applied so far. The method consists in using the low coherence white light for detection of gauge block ends by interference and measuring the reference mirror displacement corresponding to the length of the gauge block measured by the Renishaw interferometer. After modernization the more accurate method of exact fractions based on interference of two stabilized He-Ne laser light is also possible. The model equations and the detailed analysis of the uncertainty sources with the uncertainty budget and the expanded uncertainty are presented. The uncertainty budgets for both methods show that they have many common contributions.

**Keywords:** end standards, long gauge blocks, interferometry, method of exact fractions.

## 1. Wprowadzenie

Płytki wzorcowe są istotnymi wzorcami odniesienia dzięki swojej prostej geometrii, a także w związku z zapewnianiem wysokiej dokładności za rozsądną cenę. Wzorcowanie metodami interferencyjnymi pozwala powiązać długość środkową płytki wzorcowej bezpośrednio z odległością, jaką światło przebywa w próżni w czasie  $1/299792458$  sekundy, zgodnie z definicją jednostki metra Międzynarodowego Układu Jednostek Miar (SI) [1]. Płytki zmierzone interferencyjnie są używane z kolei jako wzorce odniesienia w metodach porównawczych, umożliwiając dalsze przekazywanie definicji metra w łańcuchu wzorcowań – za każdym razem z określoną niepewnością pomiaru. Mimo tego że w pomiarach obydwoma metodami (porównawczą i interferencyjną) zaangażowany jest ten sam wzorec materiałny, dominujące składowe

w szacowaniu niepewności pomiaru dla obu rodzajów wzorcowań są zasadniczo różne.

Porównując budżety niepewności pomiaru długich płytek wzorcowych względem budżetów oszacowanych dla krótkich płytek nieprzekraczających kilku milimetrów długości, można również zauważyć zdecydowaną różnicę w dominujących składowych niepewności. Z tego powodu stanowiska pomiarowe do wzorcowania długich płytek wzorcowych są zwykle oddzielnymi układami, w których położenie płytki podczas pomiaru, ze względu na jej długość, jest także inne.

## 2. Pomiar długich płytek wzorcowych na komparatorze interferencyjnym w GUM

Opracowanych zostało dotychczas wiele metod interferencyjnych pomiarów płytek wzorcowych. Do najdokładniejszych należą stanowiska wykorzystujące metodę reszt ułamkowych oraz laserowe źródła światła [2]. Komparator interferencyjny do wzorcowania długich płytek wzorcowych w Laboratorium Długości Głównego Urzędu Miar umożliwia, po modernizacji, wykonywanie pomiarów dwiema metodami. Metoda oparta na detekcji końców płytki mierzonej z wykorzystaniem efektu interferencji w świetle białym i pomiarze przemieszczenia zwierciadła odniesienia interferometrem laserowym została uzupełniona o metodę reszt ułamkowych (ang. exact fractions) opartą na laserowych źródłach światła. Dokładniejszy opis i schemat stanowiska pomiarowego przedstawiony został w artykule poświęconym opisowi zmodernizowanego komparatora interferencyjnego [3].

## 3. Równanie pomiaru

Wartość odchylenia długości środkowej od długości nominalnej płytki wzorcowej mierzonej  $d$  określa się przez wyznaczenie różnicy pomiędzy długością środkową płytki  $l_c$ , a jej długością nominalną  $L$ , ze wzoru:

$$d = l_c - L. \quad (1)$$

Odchylenie długości środkowej od długości nominalnej płytek wzorcowych odniesione do temperatury  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , z uwzględnieniem wszystkich zidentyfikowanych poprawek mających istotny wpływ na wynik pomiaru [4], wyznaczane jest z zależności:

$$d = l_r - L + l_t + l_E + l_\phi + l_\Omega + \delta l_A + \delta l_G + \delta l_w + \delta l_{\cos} + \delta l_{pp}, \quad (2)$$

gdzie:  $l_r$  – najlepsze dopasowanie długości środkowej płytki mierzonej na podstawie odczytanej reszty ułamkowej,  $L$  – długość nominalna płytki mierzonej,  $l_t$  – poprawka temperaturowa,  $l_E$  – poprawka na współczynnik załamania powietrza,  $l_\phi$  – poprawka fazowa,  $l_\Omega$  – poprawka związana z adiustacją układu optycznego,  $\delta l_A$  – poprawka zerowa związana z niepłaskością czoła fali,  $\delta l_G$  – poprawka zerowa związana z geometrią płytki mierzonej,  $\delta l_w$  – poprawka zerowa związana z warstwą przywarcia,  $\delta l_{\cos}$  – poprawka zerowa na błąd cosinusowy i justowanie interferometru;  $\delta l_{pp}$  – poprawka zerowa związana z punktami podparcia płytki mierzonej.

## 4. Równanie niepewności pomiaru

Złożona niepewność standardowa  $u_c(d)$  pomiaru odchylenia długości środkowej od długości nominalnej płytki wzorcowej, zgodnie z Przewodnikiem [5], można przedstawić w postaci:

$$u_c^2(d) = \left(\frac{\partial d}{\partial l_s}\right)^2 \cdot u^2(l_s) + \left(\frac{\partial d}{\partial L}\right)^2 \cdot u^2(L) + \left(\frac{\partial d}{\partial l_i}\right)^2 \cdot u^2(l_i) + \left(\frac{\partial d}{\partial l_E}\right)^2 \cdot u^2(l_E) + \left(\frac{\partial d}{\partial l_\varphi}\right)^2 \cdot u^2(l_\varphi) + \left(\frac{\partial d}{\partial l_\alpha}\right)^2 \cdot u^2(l_\alpha) + \left(\frac{\partial d}{\partial \delta_\lambda}\right)^2 \cdot u^2(\delta_\lambda) + \left(\frac{\partial d}{\partial \delta_G}\right)^2 \cdot u^2(\delta_G) + \left(\frac{\partial d}{\partial \delta_w}\right)^2 \cdot u^2(\delta_w) + \left(\frac{\partial d}{\partial \delta_{\cos}}\right)^2 \cdot u^2(\delta_{\cos}) + \left(\frac{\partial d}{\partial \delta_{pp}}\right)^2 \cdot u^2(\delta_{pp}), \quad (3)$$

gdzie  $u(L) = 0$ , a pozostałe składowe opisane są bardziej szczegółowo w następnym punkcie.

## 5. Źródła niepewności

### 5.1. Odczyt wartości reszty ułamekowej i długość emitowanej fali świetlnej

a) składowa dla pomiarów metodą reszt ułamkowych

Długość płytki wzorcowej mierzona jest za pomocą długości fali świetlnej lasera czerwonego. Długość fali świetlnej lasera zielonego jest używana tylko do określenia poprawnego rzędu interferencji. Długość płytki określona na podstawie odczytanej wartości reszty ułamekowej dla jednej długości fali wynosi

$$l_r = (\kappa + F) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (4)$$

gdzie:  $\kappa$  – ilość połówek długości emitowanej fali świetlnej mieszczących się w danej długości nominalnej płytki wzorcowej (rząd interferencji),  $F$  – zmierzona wartość reszty ułamekowej,  $\lambda$  – długość emitowanej fali świetlnej.

Do wielkości wpływających na  $l_r$ , należy reszta ułamkowa  $F$  oraz długość fali w próżni  $\lambda$  z niepewnościami odpowiednio  $u(F)$  oraz  $u(\lambda)$  (rząd interferencji  $\kappa$  reprezentujący ilość połówek długości emitowanej fali świetlnej mieszczących się w danej długości nominalnej płytki wzorcowej przyjmuje się jako znany). Natomiast podczas pomiarów z wykorzystaniem interferencji w świetle białym,  $l_r$  jest długością środkową płytki wyznaczoną na podstawie liczby zliczonych przez interferometr prążków  $\kappa + F$ , podczas przemieszczania karetki pomiarowej na odcinku odpowiadającym długości płytki wzorcowej.

Z zależności (4) po uwzględnieniu współczynników wrażliwości oraz wyrazów wyższego rzędu wynika, że wartość niepewności złożonej  $u(l_r)$  wynosi

$$u^2(l_r) = \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 \cdot u^2(\kappa) + \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 \cdot u^2(F) + \left(\frac{\kappa + F}{2}\right)^2 \cdot u^2(\lambda) + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot u^2(\kappa) \cdot u^2(\lambda) + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot u^2(F) \cdot u^2(\lambda). \quad (5)$$

W związku z tym, że  $\kappa$  reprezentuje wartość całkowitą rzędu interferencji oraz przyjmując, że algorytm obliczeniowy wybiera poprawną jego wartość dla mierzonej długości,  $u(\kappa) = 0$ . Stąd iloczyn

$$u^2(\kappa) \cdot u^2(\lambda) = 0. \quad (6)$$

Pozostałe składowe wyższego rzędu są pomijalnie małe, więc

$$u^2(l_r) = \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 \cdot u^2(F) + \left(\frac{\kappa + F}{2}\right)^2 \cdot u^2(\lambda). \quad (7)$$

Drugi człon w powyższym wzorze można zapisać następująco:

$$\frac{\kappa + F}{2} = \frac{L}{\lambda}, \quad (8)$$

wówczas otrzymujemy

$$u^2(l_r) = \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 \cdot u^2(F) + \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2 \cdot u^2(\lambda). \quad (9)$$

Niepewność odczytu reszty ułamekowej z obrazu interferencyjnego zależy od jakości wykonania płytki wzorcowej i stolika pomiarowego oraz jakości obrazu z kamery CCD. Niepewność określenia długości emitowanej fali świetlnej  $\lambda$  lasera czerwonego jest związana z niepewnością jego wzorcowania, uwzględniającą stabilność krótkoterminową lasera oraz dryf międzykalibracyjny. Lasery wzorcowane są za pomocą Syntezera Częstotliwości Optycznych (Państwowego Wzorca Jednostki Długości GUM).

b) składowe dla pomiarów ze światłem białym

Długość płytki wzorcowej, przy pomiarach z wykorzystaniem interferencji w świetle białym, jest mierzona za pomocą interferometru laserowego zliczającego prążki interferencyjne w trakcie przesuwania zwierciadła odniesienia. Niepewność wyznaczenia długości płytki mierzonej na podstawie wskazań interferometru wynosi

$$u^2(l_r) = u^2(l_r)_{roz} + u^2(l_r)_{pow} + u^2(l_r)_{nap} + u^2(l_r)_\lambda + u^2(l_r)_{dr}, \quad (10)$$

gdzie:  $u(l_r)_{roz}$  – niepewność od rozdzielczości interferometru laserowego,  $u(l_r)_{pow}$  – niepewność standardowa związana z powtarzalnością wskazań,  $u(l_r)_{nap}$  – składowa związana z naprowadzaniem wybranego prążka światła białego na linię znacznika,  $u(l_r)_\lambda$  – niepewność wynikająca z niestabilności długości fali promieniowania głowicy laserowej interferometru,  $u(l_r)_{dr}$  – składowa związana z dryfem międzykalibracyjnym głowicy laserowej interferometru.

### 5.2. Efekty temperaturowe

Niepewność  $u(l_r)$  związana jest z wyznaczeniem poprawki  $l_t$  na zmianę długości płytki wzorcowej pod wpływem temperatury. Podczas pomiaru interferometr laserowy automatycznie wnosi poprawkę do wskazań na podstawie podanej temperatury płytki wzorcowej ( $t_p$ ) przy określonym współczynniku rozszerzalności liniowej. W przypadku wzorcowania płytek metodą reszt ułamkowych wskazanie interferometru jest niewielkie (mierzona jest tylko reszta ułamkowa, czyli przesunięcie między prążkami) i temperatura może być określona w przybliżeniu. Natomiast do obliczeń długości środkowej płytki mierzonej na podstawie reszt ułamkowych niezbędna jest dokładna znajomość temperatury płytki.

Poprawka temperaturowa  $l_t$  dla płytki wzorcowej określona jest wzorem:

$$l_t = \theta \cdot \alpha \cdot L, \quad (11)$$

gdzie:  $\theta$  – różnica pomiędzy temperaturą płytki wzorcowej, a temperaturą odniesienia  $20^\circ\text{C}$  wynosząca  $\theta = (20^\circ\text{C} - t_p)$ ; budżet oszacowano dla pomiarów w temperaturach z zakresu  $19,8^\circ\text{C} \div 20,2^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  – współczynnik rozszerzalności liniowej materiału płytki.

Złożona niepewność  $u(l_t)$  związana z efektami temperaturowymi przy uwzględnieniu współczynników wrażliwości oraz wyrazów drugiego rzędu wynosi:

$$u^2(l_t) = (\alpha L)^2 \cdot u^2(L) + (\alpha L)^2 \cdot u^2(\theta) + (L\theta)^2 \cdot u^2(\alpha) + \theta^2 \cdot u^2(L) \cdot u^2(\alpha) + \alpha^2 \cdot u^2(L) \cdot u^2(\theta) + L^2 \cdot u^2(\alpha) \cdot u^2(\theta), \quad (12)$$

przy czym uwzględniając, że  $u(L) = 0$  otrzymujemy:

$$u^2(l_t) = (\alpha L)^2 \cdot u^2(\theta) + (L\theta)^2 \cdot u^2(\alpha) + L^2 \cdot u^2(\alpha) \cdot u^2(\theta). \quad (13)$$

Do obliczeń przyjęto typową wartość współczynnika  $\alpha$  dla stali równą  $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Zakłada się również, że pomiary płytek wzorcowych wykonywane są w temperaturach w zakresie  $19,8 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , co daje  $\theta = \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ze względu na to, że  $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C} - t_p$  można zapisać  $u(\theta) = u(t_p)$ . Wartość niepewności pomiaru temperatury płytki wzorcowej  $u(t_p)$  zależy od składowej niepewności:

- wzorcowania czujników termistorowych czujników,
- związanej z równaniem interpolacyjnym temperatury,
- związanej z dryfem wskazań czujników,
- wynikającej z gradientu temperatury w płytce.

Współczynnik rozszerzalności liniowej  $\alpha$  płytek podawany jest zwykle przez producenta. Niepewność określenia współczynnika rozszerzalności liniowej  $u(\alpha)$  przyjęto równą 10 % wartości współczynnika dla płytek stalowych.

### 5.3. Współczynnik załamania powietrza

Poprawka  $l_E = (n-1) \cdot L$  wynika z faktu, że mierzona długość jest odniesiona do wielokrotności długości fali świetlnej w powietrzu, która przeliczana jest z długości fali świetlnej w próżni na podstawie zmodyfikowanego równania Edlena [6].

Niepewność  $u(l_E)$  związana z poprawką  $l_E$  na współczynnik załamania powietrza wyrażona jest w postaci równania:

$$u^2(l_E) = \left(\frac{\partial l_E}{\partial t}\right)^2 \cdot u^2(t) + \left(\frac{\partial l_E}{\partial p}\right)^2 \cdot u^2(p) + \left(\frac{\partial l_E}{\partial R}\right)^2 \cdot u^2(R) + \left(\frac{\partial l_E}{\partial x}\right)^2 \cdot u^2(x) + \left(\frac{\partial l_E}{\partial \lambda}\right)^2 \cdot u^2(\lambda) + L^2 \cdot u^2(E). \quad (14)$$

Pochodne cząstkowe względem temperatury  $t$ , ciśnienia  $p$ , wilgotności względnej  $R$ , zawartości  $\text{CO}_2$   $x$  i długości fali  $\lambda$  dla warunków odniesienia:  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p = 100\,000 \text{ Pa}$ ,  $R = 50 \%$ ,  $x = 0,04 \%$  oraz  $\lambda = 0,632991000 \text{ } \mu\text{m}$  wynoszą odpowiednio:

$$\frac{\partial l_E}{\partial t} = -9,45 \cdot 10^{-7} \text{ L}/^\circ\text{C}; \quad \frac{\partial l_E}{\partial p} = 2,68 \cdot 10^{-9} \text{ L}/\text{Pa}; \quad \frac{\partial l_E}{\partial R} = -8,67 \cdot 10^{-7} \text{ L};$$

$$\frac{\partial l_E}{\partial x} = 1,43 \cdot 10^{-4} \text{ L}; \quad \frac{\partial l_E}{\partial \lambda} = -1,23 \cdot 10^{-5} \text{ L}/\mu\text{m}.$$

Temperatura powietrza jest mierzona tym samym multimetrem co temperatura płytki wzorcowej [3]. Zatem niepewność złożona  $u(t)$  określenia temperatury powietrza składa się z tych samych składowych co niepewność pomiaru temperatury płytki mierzonej.

Cięnienie atmosferyczne podczas pomiaru mierzone jest za pomocą miernika ciśnienia bezwzględnego umieszczonego na wysokości zbliżonej do wysokości umieszczenia płytki wzorcowej w komorze pomiarowej. Wilgotność względna powietrza jest określana na podstawie wskazań termohigrometru, który za pośrednictwem czujnika mierzy wilgotność wewnątrz komory pomiarowej interferometru. Niepewność złożona  $u(p)$  określenia ciśnienia powietrza podobnie jak niepewność  $u(R)$  określenia wilgotności względnej składa się z niepewności związanej z: wzorcowaniem miernika, zmianą wskazań w trakcie pomiaru, dryfem długoterminowym wskazań miernika oraz jego rozdzielczością.

Ze względu na niewielki wpływ zmian zawartości  $\text{CO}_2$  w powietrzu na wynik pomiaru, do obliczeń podczas wzorcowania program komputerowy używa stałej wartości równej 550 ppm przyjętej na podstawie przeprowadzonych badań w pomieszczeniu pomiarowym. Niepewność  $u(x)$  określenia zawartości  $\text{CO}_2$  w powietrzu związana jest z ewentualnym odchyleniem jego zawartości od tej wartości, które przyjęto równe  $\pm 200 \text{ ppm}$ .

Niepewność  $u(\lambda)$  określenia długości fali świetlnej, związana z niepewnością wzorcowania lasera stabilizowanego lub głowicy interferometru laserowego (w zależności od stosowanej metody), po uwzględnieniu współczynnika wrażliwości jest o kilka rzędów wielkości mniejsza od pozostałych składowych i może być pominięta.

Niepewność  $u(E)$  związana z przybliżonym charakterem empirycznego wzoru Edlena wynosi  $1 \cdot 10^{-8}$  [6].

### 5.4. Zmiana fazy fali przy odbiciu

Poprawka  $l_\phi$  na zmianę fazy światła wiązki pomiarowej zależy od różnic w optycznych właściwościach materiałów, z których wykonana jest płytka wzorcowca i płytka odniesienia. Dla długich płytek wzorcowych nie może być wyznaczana metodą stosu, więc przyjmuje się wartość stałą z odpowiednią niepewnością lub można posłużyć się innymi znanymi metodami jej wyznaczania [7]. W przypadku płytki odniesienia wykonanej ze szkła oraz stalowej płytki wzorcowej mierzonej przyjmuje się poprawkę równą +50 nm, a w przypadku płytki odniesienia wykonanej podobnie jak płytka wzorcowca mierzona – ze stali, przyjmuje się poprawkę zerową.

Niezależnie od rodzaju zastosowanej płytki odniesienia, wartość przyjętej poprawki jest wartością przybliżoną z niepewnością oszacowaną na podstawie pomiarów przeprowadzonych na innych stanowiskach pomiarowych do interferencyjnych pomiarów płytek wzorcowych, na których wyznacza się powyższą poprawkę metodą stosu.

### 5.5. Adiustacja układu optycznego

Poprawkę  $l_\Omega$ , mającą zastosowanie tylko dla metody reszt ułamkowych, związaną ze średnicą światłowodu i wartością ogniskowej kolimatora wyraża się wzorem:

$$l_\Omega = \left(\frac{a^2}{16f^2} + \frac{z^2}{2f^2}\right) \cdot L, \quad (15)$$

gdzie  $a$  jest średnicą światłowodu,  $f$  ogniskową kolimatora, a  $z$  przesunięciem poprzecznym wiązki świetlnej względem osi optycznej interferometru.

Niepewność standardowa  $u(l_\Omega)$  związana z adiustacją optyki interferometru ma postać

$$u^2(l_\Omega) = \left(\frac{aL}{8f^2}\right)^2 \cdot u^2(a) + \left(\frac{-a^2L}{8f^3}\right)^2 \cdot u^2(f) + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{L}{f^2}\right)^2 \cdot u^4(z). \quad (16)$$

Pozostałe składowe (wyższego rzędu) są pomijalnie małe.

### 5.6. Błąd czoła fali

Niepewność  $u(\delta l_A)$ , związana z błędem czoła fali, wynika z niedoskonałości optyki interferometru (aberracje w układzie optycznym) i związana jest z krzywizną czoła emitowanej fali świetlnej.

Jej wartość można oszacować na podstawie parametrów elementów optycznych układu lub dokładniej, poprzez pomiar aberracji wprowadzanych przez układ. Ma to istotne znaczenie tylko dla metody reszt ułamkowych;

### 5.7. Geometria płytki mierzonej

Niepewność  $u(\delta l_G)$  związana jest ze zmiennością długości płytki wzorcowej. Ta niedoskonałość w wykonaniu płytki sprawia, że każde przemieszczenie punktu pomiaru długości środkowej na jej powierzchni pomiarowej może spowodować powstanie zauważalnej różnicy w wyniku. Dla porównywalnych wartości zmienności długości, większy efekt występuje w kierunku poprzecznym niż podłużnym powierzchni pomiarowej.

### 5.8. Warstwa przywarcia

Długość środkowa płytki wzorcowej mierzonej interferencyjnie jest zdefiniowana w przywarcu do pomocniczej płytki interferencyjnej lub stolika pomiarowego i zawiera w swojej definicji warstwę przywarcia. Ze względu na takie czynniki jak technika przywierania, chropowatość powierzchni, zanieczyszczenia, itp. warstwa przywarcia ma zmienną wartość podczas kolejnych pomiarów.

rów. Zmienność grubości warstwy przywarca wnosi znaczny wpływ do budżetu niepewności pomiaru płytek wzorcowych metodą interferencyjną (tab. 1).

## 5.9. Błąd kosinusowy i justowanie interferometru

Niepewność  $u(\delta_{\cos})$ , występująca przy pomiarach ze światłem białym, wynika z dwóch składowych niepewności:

–  $u(\delta_{\cos})_i$  związanej z justowaniem interferometru Renishaw (zgodnie z instrukcją obsługi interferometru):

$$u(d_{\cos})_i = \frac{S^2}{8 \cdot D^2} \cdot L, \quad (17)$$

gdzie  $S$  jest przesunięciem powrotnej wiązki laserowej odbitej od retroreflektora, a  $D$  jest odległością na jaką został odsunięty retroreflektor,

–  $u(\delta_{\cos})_{op}$  związanej z błędem kosinusowym wynikającym z ustawienia elementów optycznych na drodze wiązki pomiarowej

$$u(d_{\cos})_{op} = \frac{(1 - \cos 1,4') \cdot L}{\sqrt{3}}. \quad (18)$$

## 5.10. Punkty podparcia

Płytkę wzorcowa podczas pomiaru podparta jest w dwóch punktach (punkty Airy'ego). Każde przesunięcie punktów podparcia względem powyższych punktów powodują zmianę ugięcia płytki wzorcowanej, a więc wpływa na wzajemną odległość jej powierzchni pomiarowych (zmienia się długość mierzona płytki).

Niepewność  $u(\delta l_{pp})$  związana z punktami podparcia płytki mierzony podczas wzorcowania oszacowano na podstawie analizy wyników badań przeprowadzonych z uwzględnieniem wpływu płytki odniesienia przywarcej do jednej z powierzchni pomiarowych:

$$u(\delta l_{pp}) = 0,005 \cdot L \text{ nm}. \quad (19)$$

## 6. Budżet niepewności i niepewność rozszerzona

Zestawienie składowych niepewności pomiaru na komparatorze interferencyjnym do wzorcowania długich płytek wzorcowych przedstawiono w tab. 1.

Niepewność rozszerzona wyznaczenia odchylenia długości środkowej od długości nominalnej długiej płytki wzorcowanej metodą reszt ułamkowych wynosi:

$$U = \sqrt{0,038^2 + 0,4^2 \cdot L_n^2} \mu\text{m}, \quad (20)$$

gdzie  $L_n$  jest wartością liczbową długości nominalnej wyrażonej w metrach.

Dla metody wykorzystującej interferencję w świetle białym rozszerzona niepewność pomiaru wynosi

$$U = \sqrt{0,04^2 + 0,5^2 \cdot L_n^2} \mu\text{m}. \quad (21)$$

## 7. Podsumowanie

Zmodernizowany komparator interferencyjny umożliwia wykonywanie wzorcowań długich płytek wzorcowych z niepewnością porównywalną ze zdolnościami pomiarowymi innych NMI na świecie.

W związku z tym, że znaczna liczba elementów układu pomiarowego jest wspólna dla obu metod, wiele ze składowych niepew-

ności pomiaru z wykorzystaniem interferencji w świetle białym pozostaje aktualnych dla metody reszt ułamkowych.

Tab. 1. Zestawienie składowych niepewności  
Tab. 1. The list of uncertainty contributions

Źródła niepewności	Rozkład	Współczynnik wrażliwości $c_i$	$c_i \cdot u(x_i)$ , nm
<i>Określenie długości na podstawie reszt *</i>			
Odczyt reszty ułamkowej *	normalny	$\lambda/2$	3,0
Długość fali lasera *		$L/\lambda$	$2,04 \cdot 10^{-2} L$
Wzorcowanie lasera	normalny		
Stabilność długoterminowa	prostokątny		
<i>Określenie długości za pomocą interferometru Renishaw **</i>			
Odczyt wskazań **		1	18,7
Rozdzielczość	prostokątny		
Powtarzalność wskazań	normalny		
Naprowadzanie prążka	prostokątny		
Długość fali interferometru **		$L$	$5,20 \cdot 10^{-2} L$
Wzorcowanie interferometru	normalny		
Stabilność długoterminowa	prostokątny		
<i>Efekty temperaturowe</i>			
Pomiar temperatury płytki		$aL$	$1,66 \cdot 10^{-1} L$ * $(1,72 \cdot 10^{-1} L$ **)
Wzorcowanie multimetru	normalny		
Równanie interpolacyjne	normalny		
Dryf wskazań czujnika	prostokątny		
Zmiany temp. w trakcie pomiaru **	prostokątny		
Gradient temperatury w płytce	prostokątny	$L\theta$	$1,33 \cdot 10^{-1} L$
Wsp. rozszerzalności liniowej składowa drugiego rzędu	prostokątny	$L$	$9,62 \cdot 10^{-3} L$
<i>Współczynnik załamania powietrza</i>			
Temperatura powietrza		$-9,44 \cdot 10^{-1} L$	$1,74 \cdot 10^{-2} L$ * $(1,82 \cdot 10^{-2} L$ **)
Wzorcowanie multimetru z czujnikami	normalny		
Równanie interpolacyjne	normalny		
Dryf długoterminowy wskazań czujnika	prostokątny		
Zmiana temp. w trakcie pomiaru **	prostokątny		
Gradient temperatury powietrza	prostokątny		
Ciśnienie powietrza		$2,68 \cdot 10^{-3} L$	$1,84 \cdot 10^{-2} L$ * $(4,94 \cdot 10^{-2} L$ **)
Wzorcowanie barometru	normalny		
Zmiana ciśnienia w trakcie pomiaru	prostokątny		
Dryf długoterminowy wskazań	prostokątny		
Rozdzielczość barometru	prostokątny		
Wilgotność powietrza		$-8,67 \cdot 10^{-1} L$	$8,28 \cdot 10^{-3} L$ * $(8,29 \cdot 10^{-3} L$ **)
Wzorcowanie miernika	normalny		
Zmiana wskazań w trakcie pomiaru **	prostokątny		
Dryf długoterminowy	prostokątny		
Rozdzielczość interfejsu	prostokątny		
Zawartość CO <sub>2</sub> w powietrzu	prostokątny	$1,43 \cdot 10^2 L$	$1,65 \cdot 10^{-2} L$
Równanie Edlen'a	normalny	$L$	$1 \cdot 10^{-2} L$
Adiustacja układu optycznego *			$4,42 \cdot 10^{-2} L$
Średnica światłowodów	normalny	$aL/(8f^2)$	$7,82 \cdot 10^{-4} L$
Ogniskowa kolimatora	normalny	$-a^2L/(8f^3)$	$1,57 \cdot 10^{-4} L$
Przesunięcie osi optycznej (wyraz II rzędu)	normalny	$L/(f^2\sqrt{2})$	$4,42 \cdot 10^{-2} L$
Adiustacja interferometru **		$L$	$1,37 \cdot 10^{-1} L$
Błąd kosinusowy	prostokątny		
Justowanie interferometru	prostokątny		
Błąd czoła fali *	prostokątny	1	11,55
OchYLENIE od płaskorównoległości	normalny	1	6,95
Warstwa przywarca	normalny	1	10
Punkty podparcia płytki	normalny	$L$	$4,70 \cdot 10^{-3} L$
Poprawka na zmianę fazy	prostokątny	1	11,55

\*) Występuje tylko przy metodzie reszt ułamkowych

\*\*) Występuje tylko przy pomiarach z wykorzystaniem światła białego i interferometru Renishaw

## 8. Literatura

- [1] Quinn T.J.: Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001). Metrologia 40, s. 103-133, 2003.
- [2] Hariharan P.: Basics of Interferometry. Academic Press, Inc., San Diego, 1992.
- [3] Szumski R.: Pomiar długości płytek wzorcowych na zmodernizowanym stanowisku pomiarowym z interferometrem laserowym. Pomiar Automatyka Kontrola 4 (Vol. 59), s. 304-307, 2013.
- [4] Decker J.E., Pekelsky J.R.: Uncertainty evaluation for the measurement of gauge blocks by optical interferometry. Metrologia 34, s. 479-493, 1997.
- [5] Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement. Joint Committee for Guides in Metrology. 2008.
- [6] Bönsch G., Potulski E.: Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlen's formulae. Metrologia 35, s. 133-139, 1998.
- [7] Ramotowski Z., Sałbut L.: Practical aspects of phase correction determination for gauge blocks measured by optical interferometry. Measurement Science and Technology 23, 2012.

otrzymano / received: 25.05.2014

przyjęto do druku / accepted: 01.07.2014

artykuł recenzowany / revised paper