

Robert SZUMSKI

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

Pomiary długich płytek wzorcowych na zmodernizowanym stanowisku pomiarowym z interferometrem laserowym

Mgr inż. Robert SZUMSKI

Absolwent wydziału elektrycznego Politechniki Warszawskiej na kierunku elektrotechnika. Od 2003 roku pracownik Zakładu Długości i Kąta Głównego Urzędu Miar.



e-mail: r.szumski@gum.gov.pl

Streszczenie

Stosowany od lat w Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM, komparator interferencyjny do wzorcowania długich płytek wzorcowych o zakresie pomiarowym do 500 mm, został poddany modernizacji. Metoda pomiarowa wykorzystywana na stanowisku pomiarowym oparta na efekcie interferencji w świetle białym, została uzupełniona o metodę reszt ułamkowych (*ang.* exact fractions) opartą na laserowych źródłach światła. Wprowadzone zmiany w układzie pomiarowym związane są przede wszystkim z doprowadzeniem do układu optycznego odpowiednio uformowanej wiązki światła laserowego ze światłowodu. Zastosowano ponadto nowe rozwiązanie w zakresie adiustacji zwierciadła odniesienia podczas wykonywania pomiarów, dzięki czemu został zredukowany problem ze znaczącym wpływem odchylenia od prostoliniowości ruchu karetki pomiarowej na niepewność pomiaru.

Słowa kluczowe: wzorce końcowe, długie płytki wzorcowe, komparator interferencyjny, interferencyjna metoda reszt ułamkowych.

Calibration of long gauge blocks using the modernized set-up with a laser interferometer

Abstract

The gauge block interferometer for long gauge blocks up to 500 mm, used for years in the Length Laboratory of Length and Angle Division of GUM, was modernized. The measuring method used on the measuring set-up based on the interference in white light, was supplemented with the method of exact fractions based on laser light sources. The measurement of gauge blocks with the modernized set-up may be carried out using the method applied so far, which involves the use of the low coherence white light to detection of gauge block ends by interference and the measuring of the reference mirror displacement corresponding to the length of a gauge block measured by the Renishaw interferometer. After modernization the measurement with use of laser light interference is also possible. For the method of exact fractions, two stabilized He-Ne lasers with wavelengths of 633 nm and 543 nm are used as the standards. The main changes of the measuring system are related to providing a properly formed laser light beam from optical fiber and additional optical elements to the optical system. Moreover, a new solution for the reference mirror adjustment during measurement has been applied. Due to it, the problem with non-rectilinear slideways of the measuring carriage has been reduced. Validation of the methods was carried out during the within-laboratory comparisons. The uncertainty budget analysis and measurement results of long gauge blocks show that both method complement each other.

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

1. Wprowadzenie

Płytki wzorcowe, wynalezione w 1896 roku przez Szweda C. E. Johansson'a [1], są szeroko stosowanymi w praktyce wzorcami długości, wykorzystywanymi do wzorcowania przyrządów

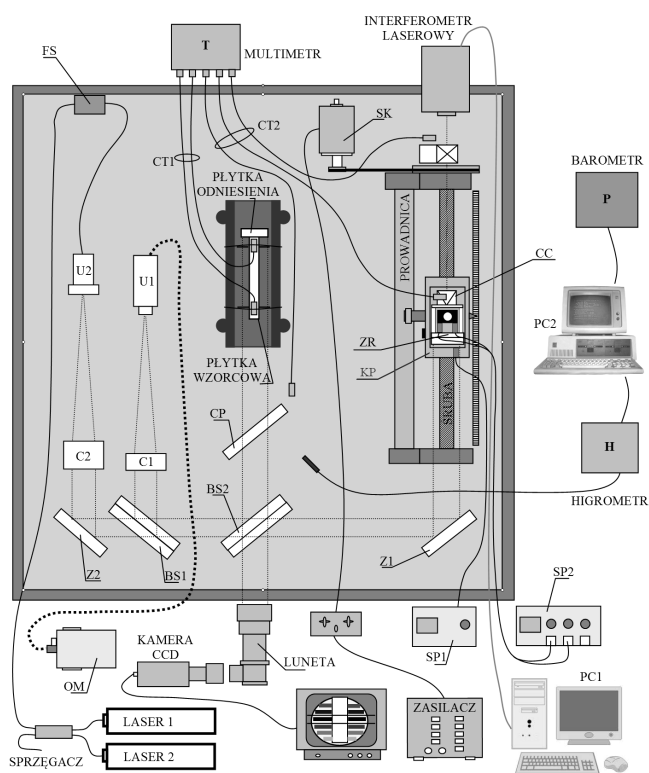
pomiarowych mierzących długość, takich jak mikrometry i przyrządy czujnikowe. Zwykle dokonuje się podziału na krótkie płytki wzorcowe (o długościach nominalnych do 100 mm) oraz długie płytki wzorcowe – powyżej 100 mm, przy czym niepewność pomiaru rośnie zwykle szybko wraz z ich długością nominalną. Z tego powodu pomiar płytek długich stanowi odrębne zagadnienie i wymaga zastosowania innych rozwiązań przy opracowywaniu metody pomiarowej. Wzorcowanie płytek wzorcowych wykonuje się metodami porównawczymi oraz z wykorzystaniem zjawiska interferencji (zwykle w zależności od ich stanu technicznego i klasy dokładności) [2]. Opracowanych zostało dotychczas wiele metod interferencyjnych pomiarów płytek wzorcowych [3-7]. Do najdokładniejszych należą stanowiska wykorzystujące metodę reszt ułamkowych oraz laserowe źródła światła. Stosowanie tej metody wymaga jednak wcześniejszej znajomości przybliżonej długości mierzonej płytki wzorcowej, z niepewnością zależną od zastosowanych źródeł światła (wzorcowych długości fal laserów stabilizowanych). W celu uzyskania przybliżonej długości mierzonej płytki wzorcowej można posłużyć się metodami porównawczymi, jednak wymagają one stosowania płytek wzorcowych odniesienia. Cała procedura pomiaru, z uwagi na fakt korzystania z drugiego stanowiska pomiarowego, staje się kłopotliwa i czasochłonna (przygotowanie płytek odniesienia, konieczność odczekania przed pomiarem na ustabilizowanie się temperatur). Prezentowane w tym artykule stanowisko pomiarowe umożliwiający wzorcowanie długich płytek wzorcowych o długościach nominalnych do 500 mm, wykorzystuje od samego początku swojego istnienia inną metodę – opartą o zjawisko interferencji w świetle białym i pomiar długości płytki wzorcowej za pomocą interferometru laserowego metodą zliczania prążków interferencyjnych. Metoda ta teoretycznie nie wymaga wcześniejszej znajomości nawet długości nominalnej mierzonej płytki i pozwala na jednoznaczne określenie wyniku pomiaru, ale jest metodą bardziej czasochłonną od zastosowanej obecnie metody reszt ułamkowych i wiąże się w praktyce z trudnościami adiustacyjnymi (opisanymi w dalszej części artykułu), które wpływają znacząco na niepewność pomiaru i łatwość jego wykonywania.

Tym, co odróżnia opisywane stanowisko pomiarowe od rozwiązań znanych od lat [7], jest przede wszystkim zastosowanie dwóch laserów stabilizowanych jako źródeł wzorcowych długości fal 633 nm i 543 nm. Zakres pomiarowy zapewniany przez jeden laser, jest znacznie mniejszy i wymaga wstępnej znajomości długości płytki wzorcowej z niepewnością mniejszą niż $\lambda/4$ (czyli zwykle mniejszą niż 0,16 μm). Taka niepewność pomiaru dla długich płytek wzorcowych (szczególnie o długościach powyżej 300 mm) jest trudno osiągalna nawet przy pomiarach interferencyjnych ze światłem białym. Nie jest również możliwe w takiej sytuacji wykorzystywanie np. poprzednich wyników wzorcowania jako przybliżonych wyników dla metody reszt ułamkowych, ze względu na ich niepewność pomiaru oraz potencjalny dryf długości płytek od ostatnich pomiarów. Dzięki zastosowaniu dwóch źródeł laserowych w większości praktycznych przypadków pomiarowych nie ma konieczności stosowania znacznie bardziej kłopotliwej metody ze światłem białym, gdyż często dostatecznie przybliżona wartość długości mierzonej płytki jest znana (np. na podstawie poprzednich wyników wzorcowania lub ze względu na deklarowaną klasę dokładności). Zastosowanie powyższych dwóch długości fal laserów zwiększa praktyczny zakres pomiarowy dla metody reszt ułamkowych do około 1,9 μm .

2. Zmiany w układzie pomiarowym

Stosowany od lat układ pomiarowy oparty o zjawisko interferencji w świetle białym został poddany modernizacji, w wyniku której stanowisko pomiarowe rozszerzone zostało o możliwość wykonywania pomiarów metodą reszt ułamkowych (*ang.* exact fractions). Do podstawowych zmian zastosowanych w układzie pomiarowym należy doprowadzenie do układu optycznego odpowiednio uformowanej wiązki światła laserowego oraz zastosowanie nowego rozwiązania w zakresie adiustacji zwierciadeł odniesienia. Rezultatem zmian w układzie pomiarowym jest możliwość wykonywania wzorcowania obiema metodami.

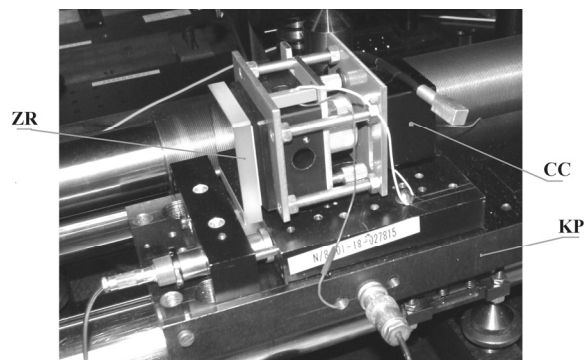
Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat komparatora interferencyjnego do długich płytek wzorcowych
Fig. 1. Diagram of the long gauge blocks interferometer

Źródłem światła białego jest oświetlacz mikroskopowy OM, z którego światło za pomocą kabla światłowodowego doprowadzane jest do uchwytu U1, gdzie poprzez filtr otwarkowy i kolimator C1 wprowadzane jest do dalszej części układu optycznego. Źródłem światła quasi-monochromatycznego są dwa lasery stabilizowane helowo-neonowe o długościach fal $\lambda_1 = 633$ nm (barwa czerwona) i $\lambda_2 = 543$ nm (barwa zielona). Światło laserów, poprzez asymetryczny sprzęgacz światłowodowy i układ wibracyjny do redukcji niejednorodności rozkładu natężenia światła (*ang.* speckle pattern) trafia światłowodem wielomodowym do uchwytu U2. Płytką światłodzielną BS1 łączy tory optyczne od obu źródeł światła. Płytką światłodzielną zapewniającą interferencję oraz płytka kompensacyjna dla światła białego oznaczone są odpowiednio przez BS2 i CP. Wiązka przedmiotowa odbija się od powierzchni pomiarowych płytki wzorcowej mierzonej i przywarłej do niej płytki odniesienia umieszczonych na regulowanym stoliku pomiarowym. Zwierciadło Z1 kieruje wiązkę odniesienia do zwierciadła odniesienia ZR, które wspólnie ze zwierciadłem odniesienia (retroreflektorem CC) interferometru laserowego, umieszczone jest na karetki pomiarowej KP poruszanej przez śrubę napędową i silnik krokowy SK. Po modernizacji układu, ustawienie kątowe połączonych zwierciadeł odniesienia może być

zmieniane w trakcie pomiaru za pomocą aktuatorów piezoelektrycznych sterowanych przez zasilacz trójkanałowy.



Rys. 2. Fotografia karetki pomiarowej z regulowanymi zwierciadłami odniesienia
Fig. 2. View of the measuring carriage with adjustable reference mirrors

Mikroprzesuw karetki pomiarowej realizowany jest również za pomocą układu piezoelektrycznego. Zmiana położenia karetki mierzona jest metodą zliczania prążków interferencyjnych przez interferometr laserowy, który współpracuje z programem pomiarowym uruchomionym na komputerze PC1. Wyjściowa wiązka pomiarowa poprzez lunetę skupiającą trafia na matrycę kamery CCD, a obraz jest obserwowany na dodatkowym monitorze. Do pomiaru warunków środowiskowych służy barometr, higrometr oraz multimetr z zestawem termistorowych czujników temperatury materiału płytki wzorcowej oraz powietrza.



Rys. 3. Fotografia układu optycznego wewnątrz obudowy
Fig. 3. View of the optical system inside the housing

3. Pomiar płytek wzorcowych

Do powierzchni pomiarowej płytki wzorcowej przywierana jest płytka odniesienia. Płytką wzorcową umieszczaną jest następnie na podporach (ustawionych w punktach Airy'ego) regulowanego stolika pomiarowego. Pomiar z wykorzystaniem interferencji w świetle białym wymaga uzyskania prążków interferencyjnych na nieprzywarłej powierzchni pomiarowej płytki mierzonej oraz na powierzchni płytki odniesienia. Ze względu na niską koherencję czasową światła białego, obraz prążkowy pojawia się tylko przy zrównaniu dróg optycznych ramion interferometru (przedmiotowym i odniesienia). W obrębie barwnego interferogramu prążkiem odniesienia jest prążek czarny (tzw. zerowy) wprowadzany w obszar bisektora pomiarowego. Obraz prążkowy na drugiej powierzchni uzyskiwany jest poprzez przemieszczenie karetki pomiarowej ze zwierciadłem odniesienia ZR, a jej przesunięcie mierzone jest za pomocą interferometru laserowego, dla którego zwierciadłem odniesienia jest retroreflektor CC. Proble-

mem podczas pomiarów tą metodą jest długi czas pomiaru związany z powolnym przemieszczaniem karetki pomiarowej oraz sam jej przesuw. W czasie przemieszczania karetki, warunki środowiskowe stopniowo ulegają zmianie powodując zwiększenie niepewności pomiaru, jednocześnie ruch karetki ulega odchyleniom od prostoliniowości, które nie do końca mogą zostać skompensowane poprzez korektę adiustacji zwierciadeł odniesienia.

Powyższe problemy nie występują podczas pomiarów metodą reszt ułamkowych, ponieważ karetką pomiarową pozostaje wówczas prawie nieruchoma. Dzięki dużej koherencji światła laserowego, obraz prążkowy jest widoczny jednocześnie na obu powierzchniach pomiarowych (płytki wzorcowej i płytki odniesienia). Karetką pomiarową poruszana jest przez aktuator piezoelektryczny zwykle nie więcej niż o $\lambda/2$ podczas odczytu reszty ułamkowej. W oparciu o uzyskane interferogramy dla dwóch długości fali oraz zarejestrowane warunki środowiskowe, ustala się ostateczny wynik pomiaru.

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

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

Przy odniesieniu długości płytki do 20 °C oraz uwzględniając poprawki występujące podczas pomiaru otrzymuje się równanie pomiaru postaci:

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

gdzie:

– l_c jest najlepszym dopasowaniem długości środkowej płytki mierzonej w oparciu o metodę reszt ułamkowych, które dla dwóch długości fali ($q = 2$) wyraża się wzorem [13]:

$$l_c = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q (\kappa_i + F_i) \frac{\lambda_i}{2} \quad (3)$$

przy czym wielkości wpływające na l_c , oddziałują na resztę ułamkową F_i (rząd interferencji κ_i przyjmuje się jako znany) oraz na długości fali w próżni; podczas pomiarów ze światłem białym, l_c jest długością środkową płytki wyznaczoną na podstawie liczby zliczonych przez interferometr prążków $\kappa + F_i$ dla jednej długości fali, podczas przemieszczania karetki pomiarowej na odcinku odpowiadającym długości płytki wzorcowej;

– L jest długością nominalną płytki mierzonej (różnica wynikająca ze stosowania w poniższych wzorach długości nominalnej L zamiast długości zmierzonej l_c jest zaniedbywalna);

– poprawka na temperaturę płytki wynosi:

$$l_t = \theta \cdot \alpha \cdot L \quad (4)$$

i pojawia się, gdy temperatura płytki wzorcowej t_p odbiega od 20 °C, więc $\theta = 20 - t_p$; natomiast α jest współczynnikiem temperaturowej rozszerzalności liniowej;

– poprawka l_E wynika z faktu, że mierzona długość jest odniesiona do wielokrotności długości fali świetlnej w powietrzu, która przeliczana jest z długości fali świetlnej w próżni w oparciu o zależność:

$$l_E = (n - 1) \cdot L \quad (5)$$

gdzie n jest współczynnikiem załamania powietrza wyznaczanym ze wzoru empirycznego – zmodyfikowanego równania Edlen'a [8-11] na podstawie monitorowanych warunków otoczenia (tj. ciśnienia atmosferycznego, wilgotności względnej i temperatury powietrza);

- poprawka na zmianę fazy l_ϕ jest związana z różnicą w zmianie fazy fali przy odbiciu od powierzchni pomiarowej płytki wzorcowej oraz powierzchni płytki odniesienia i obejmuje również inne różnice w odbiciu, a także chropowatość powierzchni pomiarowych, które wpływają na różnicę między drogą optyczną a geometryczną; poprawka dla długich płytek nie może być wyznaczana metodą stosu więc przyjmuje się wartość stałą z odpowiednią niepewnością lub można posłużyć się innymi znanymi metodami jej wyznaczania [7, 12];
- poprawka l_Ω związana z adiustacją układu optycznego wyraża się wzorem:

$$l_\Omega = \left(\frac{a^2}{16f^2} + \frac{z^2}{2f^2} \right) \cdot L \quad (6)$$

gdzie a jest średnicą światłowodu, f to ogniskowa kolimatora, a z jest przesunięciem poprzecznym wiązki świetlnej względem osi optycznej interferometru (poprawka występuje tylko dla pomiarów metodą reszt ułamkowych);

- poprawka δl_A jest zerową poprawką z niezerową niepewnością związaną z błędami frontu falowego spowodowanego niedoskonałościami układu optycznego i ma istotne znaczenie tylko dla metody reszt ułamkowych;
- poprawka na geometrię płytki mierzonej δl_G jest poprawką zerową z niepewnością związaną z odchyleniem od płaskości powierzchni pomiarowych i zmiennością długości płytki; te niedoskonałości w wykonaniu płytki wzorcowej powodują występowanie różnic przy pomiarach płytki przywarłej stroną lewą a następnie prawą, a także każde przemieszczenie punktu pomiaru długości środkowej na powierzchni pomiarowej płytki może spowodować powstanie zauważalnej różnicy w wyniku;
- δl_w jest zerową poprawką na przywarcie z niepewnością pochodzącą od występujących (pomiędzy kolejnymi wzorcowaniami tej samej płytki) różnic w grubości warstwy przywarcia pomiędzy powierzchnią płytki wzorcowej a przywartą do niej płytką odniesienia;
- poprawka zerowa δl_{\cos} powiązana jest z niepewnością pochodzącą od niedokładności adiustacji interferometru laserowego oraz błędu kosinusowego przy pomiarach z wykorzystaniem interferencji w świetle białym;
- ostatnia poprawka związana z punktami podparcia δl_{pp} jest zerową poprawką z niepewnością wynikającą z potencjalnych niedokładności ustawieniu punktów podparcia płytki względem punktów Airy'ego.

W przypadku znajomości przybliżonej długości środkowej płytki wzorcowej, co w praktyce laboratorium jest dość częstą sytuacją, wzorcowanie ogranicza się do pomiarów metodą reszt ułamkowych.

4. Osiągane niepewności pomiaru

Charakterystycznymi źródłami niepewności dla metody reszt ułamkowych są błędy frontu falowego wprowadzane przez elementy układu optycznego (kolimacja, aberracje) oraz źródło światła. Przy pomiarach z użyciem światła białego, charakterystycznymi źródłami niepewności są błędy justowania interferometru zwiększane przez odchylenia od prostoliniowości przesuwu karetki pomiarowej, a także zmieniające się w czasie pomiaru warunki środowiskowe. Pozostałe składowe w większości są wspólne dla obu metod ze względu na wspólny w dużej części układ pomiarowy.

Najlepsza zdolność pomiarowa związana z wyznaczeniem odchylenia długości środkowej od długości nominalnej płytki wzorcowanej metodą reszt ułamkowych wynosi:

$$U = \sqrt{0,038^2 + 0,4^2 \cdot L_n^2} \text{ } \mu\text{m} \quad (7)$$

gdzie L_n jest wartością liczbową długości nominalnej wyrażonej w metrach.

Dla metody wykorzystującej interferencję w świetle białym najlepsza zdolność pomiarowa wynosi

$$U = \sqrt{0,04^2 + 0,5^2 \cdot L_n^2} \mu\text{m} \quad (8)$$

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

Składowa 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/λ	$2,04 \cdot 10^{-2} L$
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>Efekte temperaturowe</i> Pomiar temperatury płytki		αL	$1,66 \cdot 10^{-1} L *$ $(1,72 \cdot 10^{-1} L **)$
Wzorcowanie multimetru	normalny		
Równanie interpolacyjne	normalny		
Dryf wskazań czujnika	prostokątny		
Zmiany temp. w trakcie pomiaru **	prostokątny		
Gradient temperatury w płytce	prostokątny		
Wsp. rozszerzalności liniowej	prostokątny	$L\theta$	$1,33 \cdot 10^{-1} L$
<i>składowa drugiego rzędu</i>		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		
Gradient ciśnienia	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 ₂ w powietrzu	prostokątny	$1,43 \cdot 10^{-2} L$	$1,65 \cdot 10^{-2} L$
Równanie Edlén'a	normalny	L	$1 \cdot 10^{-2} L$
<i>Adiustacja układu optycznego *</i> Średnica światłowodu	normalny	$aL/(8f^2)$	$4,42 \cdot 10^{-2} L$ $7,82 \cdot 10^{-4} L$
Ogniskowa kolimatora	normalny	$-a^2L/(8f^3)$	$1,57 \cdot 10^{-4} L$
Przesunięcie osi optycznej (wyraz II rzędu)	normalny	$L/(f^2 \cdot \sqrt{2})$	$4,42 \cdot 10^{-2} L$
<i>Adiustacja interferometru **</i> Błąd kosinusowy	prostokątny	L	$1,37 \cdot 10^{-1} L$
Justowanie interferometru	prostokątny		
Błąd czola fali *	prostokątny	1	11,55
Odchylenie 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

*¹) Występuje tylko przy metodzie reszt ułamkowych

**²) Występuje tylko przy pomiarach z wykorzystaniem światła białego i interferometru Renishaw

Tabela 1 prezentuje zestawienie składowych niepewności pomiaru długich płytek wzorcowych na komparatorze interferencyjnym.

5. Podsumowanie

Zaprezentowany zmodernizowany komparator interferencyjny do wzorcowania długich płytek wzorcowych jest stanowiskiem pomiarowym zapewniającym możliwość kompleksowego wzorcowania płytek wzorcowych z niepewnością charakterystyczną dla metody reszt ułamkowych, a jednocześnie bez ograniczeń wynikających z jej zakresu pomiarowego.

Dzięki zastosowaniu obu metod pomiarowych na jednym stanowisku pomiarowym, znaczna liczba elementów układu jest wspólna dla obu metod, a tym samym mniejsza niż w przypadku dwóch niezależnych układów pomiarowych.

Brak konieczności przenoszenia płytki wzorcowej na inne stanowisko pomiarowe znacznie skraca czas wzorcowania dwiema metodami (płytką i układ pomiarowy stabilizują się temperaturowo przed pomiarem tylko raz).

Wprowadzona możliwość pomiaru metodą reszt ułamkowych umożliwia przeprowadzenie wzorcowania znacznie szybciej oraz z mniejszą niepewnością pomiaru.

6. Literatura

- [1] Althin T. K. V., Johansson C. E., 1864-1943: The Master of Measurement. Nordisk Rotogravyr, Stockholm (1948).
- [2] PN-EN ISO 3650: 1999 Wzorce długości. Płytki wzorcowe.
- [3] Lewis A. J.: Absolute length measurement using multiple-wavelength phase-stepping interferometry, PhD Thesis. University of London (1993).
- [4] Bitou Y., Hirai A., Yoshimori H., Hong F., Zhang Y., Onae A., Seta K.: Gauge block interferometer using three frequency-stabilized lasers. Proc. SPIE 4401 (2001), 288-297.
- [5] Dobosz M., Iwasińska-Kowalska O.: A new method of non-contact gauge block calibration using a fringe-counting technique: I. Theoretical basis. Optics & Laser Technology 42 (2010), 141-148.
- [6] Iwasińska-Kowalska O., Dobosz M.: A new method of noncontact gauge block calibration using the fringe counting technique: II. Experimental verification. Optics & Laser Technology 42 (2010), 149-155.
- [7] Ikonen E., Riski K.: Gauge-block interferometer based on one stabilized laser and a white-light source. Metrologia 30 (1993), 95-104.
- [8] Edlén B.: The refractive index of air. Metrologia 2 (1996), 71-80.
- [9] Birch K. P., Downs M. J.: An updated Edlén equation for the refractive index of air. Metrologia 30 (1993), 155-162.
- [10] Birch K. P., Downs M. J.: Correction to the updated Edlén equation for the refractive index of air. Metrologia 31 (1994), 315-316.
- [11] Bönsch G., Potulski E.: Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formulae. Metrologia 35, (1998), 133-139.
- [12] Ramotowski Z., Sałbut L.: Practical aspects of phase correction determination for gauge blocks measured by optical interferometry. Measurement Science and Technology 23 (2012).
- [13] Decker J. E., Pekelsky J. R.: Uncertainty evaluation for the measurement of gauge blocks by optical interferometry. Metrologia 34, (1997), 479-493.

otrzymano / received: 29.01.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.03.2013

artykuł recenzowany / revised paper