

**Piotr SOSINOWSKI**

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

## Modernizacja przesuwu karetki pomiarowej na stanowisku komparatora interferencyjnego do wzorcowania wzorców kreskowych

Mgr inż. Piotr SOSINOWSKI

Studia magisterskie ukończył w 2006 r. na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej w Instytucie Metrologii i Systemów Pomiarowych. W tym samym roku rozpoczął pracę w Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta w Głównym Urzędzie Miar. Zajmuje się interferencyjnymi pomiarami długości, w szczególności wzorcowaniem wzorców kreskowych, przymiarów, maszyn długościowych.



e-mail: sosinowski@wp.pl

### Streszczenie

W referacie przedstawiono budowę oraz zasadę pomiaru wykorzystywaną na komparatorze interferencyjnym do wzorcowania wzorców kreskowych oraz opisano modernizację posiadanego przez Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM stanowiska pomiarowego, która polegała na zaprojektowaniu i wykonaniu stolika powietrznego, zbudowanego z prowadnicy granitowej i łożysk powietrznych, napędzanego przez silnik krokowy. W artykule przedstawiono zalety zastosowanego rozwiązania, wyniki pomiarów wraz ze sposobem wyznaczenia błędów geometrycznych stolika powietrznego i ich wpływ na niepewność pomiaru wzorców kreskowych.

**Słowa kluczowe:** wzorce kreskowe, pomiary interferencyjne, stół powietrzny.

### Development of air-bearing stage for line scale interferometric comparator

#### Abstract

The line scales are important physical standards of length used for accurate positioning or measurement in one, two or three dimensions [1]. It plays an important role in ensuring the traceability of measurements made with instruments such as microscopes, measuring projectors, length measuring machines, measuring magnifiers or, more commonly used, vision systems for length measurements. The growing need for calibration of this type instruments and the need to ensure the accurate calibration of the line scales require maintaining and continuous upgrading of the line scale interferometric comparator. The calibration accuracy largely depends on the accuracy of the measuring carriage motion of the attached line scale in both the visual system and the laser interferometer, as the reference standard. The accuracy of measurement is affected by a number of factors, which causes that the measured value differs from the actual one. These factors are inaccurate execution and transmission wear, such as screw – nut system or the guide wear. By replacing the previously used mechanical movement with the precision air-bearing stage, a much smaller uncertainty of calibration of the line scales was achieved. The paper presents the modernized by the Length Laboratory of the Department of Length and Angle of GUM measuring station which allows the calibrations of the line scales of the nominal lengths from 1 mm to 500 mm, and describes the impact of angular errors of the measuring carriage on the measurement results.

**Keywords:** line scales, laser interferometer, air-bearing stage.

## 1. Wstęp

Wzorce kreskowe są ważnymi materialnymi wzorcami długości, używanymi do dokładnego pozycjonowania lub pomiarów w jednym, dwu lub trzech wymiarach [1]. Pełnią istotną rolę w zapewnieniu spójności pomiarów wykonywanych za pomocą przyrządów takich jak: mikroskopy uniwersalne, projektory pomiarowe, maszyny długościowe, lupy pomiarowe oraz coraz powszechniej stosowanych systemów wizyjnych do pomiaru

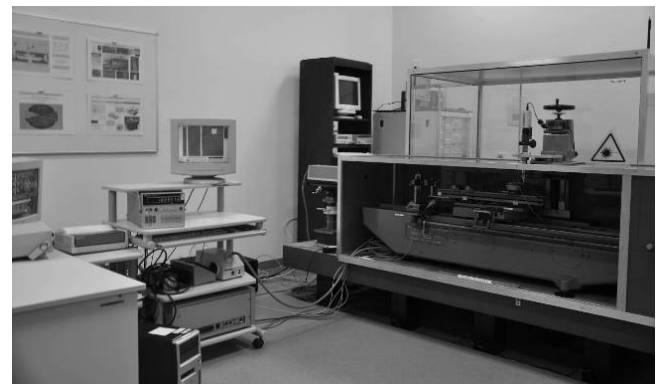
długości. Rosnące potrzeby na wzorcowanie tego rodzaju przyrządów oraz konieczność zapewnienia realizacji usług na odpowiednim poziomie wymagają utrzymywania i ciągłej modernizacji jedyne w kraju stanowiska pomiarowego do wzorcowania wzorców kreskowych.

Dokładność wzorcowania w dużej mierze zależy od dokładności realizacji ruchu karetki pomiarowej z zamocowanym na niej wzorcem kreskowym zarówno względem układu wizyjnego, jak i interferometru laserowego, stanowiącego wzorzec odniesienia. Na dokładność przesuwu negatywny wpływ ma szereg czynników, które powodują, że wartość zmierzona różni się od wartości prawdziwej. Do czynników tych należy niedokładność wykonania oraz zużycie elementów przeniesienia napędu, takich jak układ śruby-nakrętka czy też zużycie prowadnic. Dzięki zastąpieniu dotychczas stosowanego przesuwu mechanicznego precyzyjnym przesuwem pneumatycznym, uzyskano znacznie mniejszą niepewność wzorcowania wzorców kreskowych.

Artykuł ma na celu zaprezentowanie zmodernizowanego przez Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM stanowiska umożliwiającego wzorcowanie wzorców kreskowych o długościach nominalnych od 1 mm do 500 mm oraz wskazanie wpływu błędów nieprostoliniowości przesuwu karetki pomiarowej na wyniki pomiarów i ich niepewność.

## 2. Budowa stanowiska pomiarowego

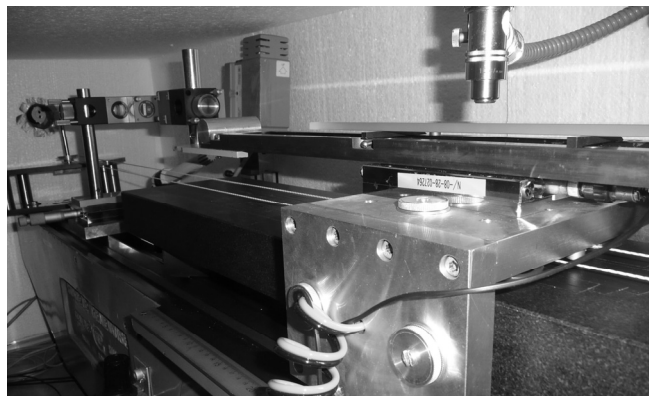
Na rys. 1 przedstawiono komparator interferencyjny do wzorcowania wzorców kreskowych. Stanowisko znajduje się w pomieszczeniu laboratoryjnym o kontrolowanej temperaturze otoczenia w granicach  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$  i jest ustawione na specjalnej, odizolowanej od drgań podłoża, płycie oraz osłonięte obudową zabezpieczającą przed ruchami powietrza. Ponadto główne źródła ciepła umieszczone zostały poza obudową stanowiska.



Rys. 1. Komparator interferencyjny do wzorcowania wzorców kreskowych  
Fig. 1. The line scale interferometric comparator

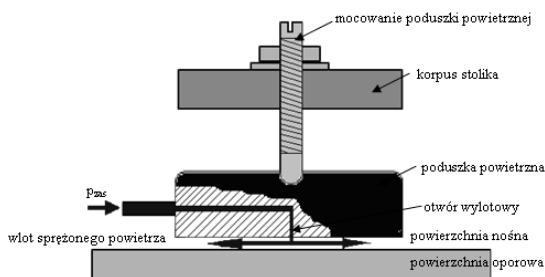
Podstawę stanowiska stanowi masywne łożo maszyny długościowej, na którym przesuwa się zdalnie sterowana karetka pomiarowa z zamontowanym na niej stolikiem pomiarowym, mierzonym wzorcem kreskowym i optyką interferometru laserowego. Kolumna pionowa służy do zamocowania i ustawienia mikroskopu z kamerą CCD, poprzez które obraz kresek wzorca jest przekazywany na ekran monitora. Wzorcem odniesienia jest laser He-Ne interferometru HP-5528A z urządzeniem odczytowym, kompletem trzech czujników temperatury materiału i zespołem kompensacji długości fali w powietrzu.

Stolik pomiarowy, przedstawiony na rysunku 2, stanowi liniał granitowy prosty o wymiarach (1000 x 160 50) mm, jako prowadnica, ustawiona na odpowiednich podporach, po której, dzięki zastosowaniu poduszek powietrznych zasilanych sprężonym powietrzem, przesuwa się korpus stolika [2]. Przesunięcie stolika powietrznego realizowane jest przez napęd ciągnowy, który stanowi naprężona linka napędzana przez silnik krokowy z przekładnią planetarną.



Rys. 2. Widok ogólny stolika powietrznego z napędem ciągnowym  
Fig. 2. Air-bearing stage with wire driving mechanism

W budowie stolika powietrznego wykorzystano zasadę działania łożysk powietrznych, którą przedstawiono na rysunku 3. Polega na zrównoważeniu siły ciężkości przesuwanego korpusu stolika przez siłę wywołaną ciśnieniem powietrza działającym na powierzchnię nośną łożyska [3].



Rys. 3. Zasada działania łożyska powietrznego  
Fig. 3. Principle of air bearing working

Sprężone powietrze, przez wlot i wykonany w łożysku powietrznym otwór, dostarczane jest pod powierzchnię nośną łożyska i powierzchnię oporową tworząc cienką warstwę, zwaną filmem powietrznym, o grubości od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów nie dopuszczając do bezpośredniego kontaktu tych powierzchni. Następuje wówczas zanik sił tarcia pomiędzy łożyskiem powietrznym a liniałem granitowym, co umożliwia łatwe przesuwanie korpusu stolika.

Grubość filmu powietrznego nakłada wysokie wymagania dotyczące powierzchni oporowej, której chropowatość i falistość muszą być mniejsze od jego grubości. W przypadku błędów kształtu prowadnicy większych od grubości filmu powietrznego następuje mechaniczny styk i pojawia się siła tarcia, a w przypadku wgłębień powietrze nimi szybko wypływa, powodując spadek ciśnienia i utratę nośności.

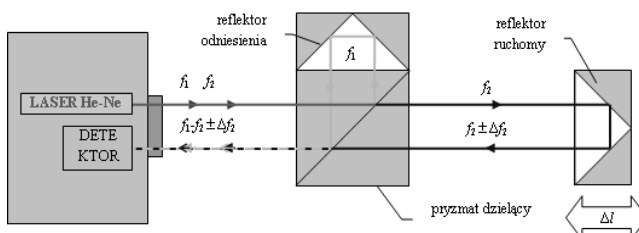
Korpus stolika powietrznego wykonany jest w formie ceownika z aluminium, w którym wykonano nagwintowane otwory, umożliwiające montaż poduszek powietrznych. W zastosowanym rozwiązaniu wykorzystano 6 poduszek powietrznych: trzy przesuwały się po powierzchni górnej i trzy po ścianach bocznych prowadnicy granitowej. Takie rozmieszczenie ułatwia wypoziomowanie korpusu stolika względem prowadnicy.

Przeniesienie napędu z silnika krokowego realizowane jest za pomocą przekładni ciągnowej, którą stanowi specjalna linka kev-

larowa, zamocowana do górnej płyty korpusu stolika powietrznego, opasująca dwa, przeciwległe zamocowane koła. Z silnika krokowego, sterowanego z komputera poprzez port USB, moment obrotowy przekazywany jest na planetarną przekładnię redukcyjną z kołem napędowym a następnie zamieniany na siłę ciągnącą korpus stolika powietrznego po prowadnicy granitowej.

### 3. Wyniki pomiarów

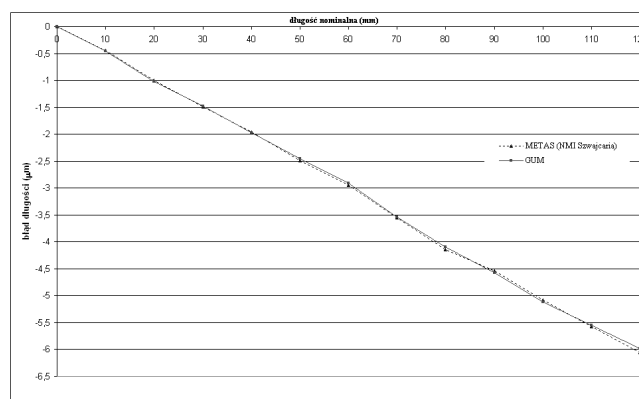
Zasadę pomiaru długości [4], wykorzystywaną podczas wzorcowania wzorców kreskowych na komparatorze interferencyjnym, przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Zasada pomiaru długości  
Fig. 4. Principle of the distance measurement

Dwuczęstotliwościowy laser He-Ne, którego działanie oparte jest na zjawisku Zeemana, generuje promieniowanie o dwóch, nieznacznie różniących się częstotliwościach. Wiązka światła rozdziela się w pryzmacie dzielącym na dwie wiązki: pomiarową  $f_2$ , która biegnie do reflektora przymocowanego do ruchomej karetki pomiarowej oraz odniesienia  $f_1$ , biegnącą do nieruchomego reflektora odniesienia. Przesunięcie ruchomego reflektora spowoduje, że częstotliwość wiązki  $f_2$  ulegnie zmianie o  $\pm \Delta f_2$ , zgodnie ze zjawiskiem Dopplera. Po odbiciu wiązki wracają do pryzmatu dzielącego, gdzie w wyniku ich interferencji pojawia się częstotliwość  $f_1 - f_2 \pm \Delta f_2$ , będąca podstawą do wyznaczenia wartości przesunięcia  $\Delta l$ . Jako wynik pomiaru odległości między dwiema kreskami wzorca przyjmuje się wartość przesunięcia karetki pomiarowej od jednej do drugiej kreski, obserwowanej na ekranie monitora i ręcznie pozycjonowanej symetrycznie w obszarze bisektora. Wartości odległości wskazywane przez interferometr są korygowane ze względu na zmiany, w trakcie pomiaru, temperatury materiału mierzonego wzorca kreskowego oraz współczynnika załamania światła w powietrzu, w zależności od temperatury powietrza, ciśnienia, wilgotności i zawartości w nim dwutlenku węgla, zgodnie z wzorem Edlena [5].

Na rys. 5 przedstawiono wyniki walidacji metody pomiaru [6], polegającej na porównaniu wyników pomiarów wzorca kreskowego szklanego o długości nominalnej 120 mm, wykonanych w Głównym Urzędzie Miar oraz w METAS – Krajowej Instytucji Metrologicznej Szwajcarii.



Rys. 5. Wyniki pomiarów długości 120 mm wzorca kreskowego w GUM i METAS  
Fig. 5. Results of the length measurements of 120 mm line scale in GUM and METAS

Różnice między wynikami nie przekraczają wartości  $\pm 0,10 \mu\text{m}$ , a rozszerzone niepewności pomiaru wynoszą odpowiednio:  $0,20 \mu\text{m}$  (GUM) i  $0,10 \mu\text{m}$  (METAS), co przedstawiono w tabeli 1.

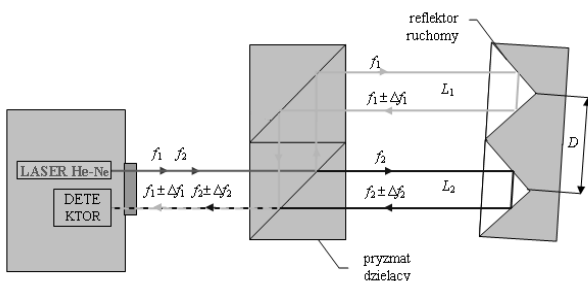
Tab. 1. Porównanie wyników pomiarów długości 120 mm wzorca kreskowego  
Tab. 1. Results of the length measurements of 120 mm line scale

Długość nominalna, mm	Błędy długości, $\mu\text{m}$		Różnica, $\mu\text{m}$
	METAS	GUM	GUM - METAS
0	0,00	0,00	0,00
10	-0,45	-0,46	-0,01
20	-1,00	-1,02	-0,02
30	-1,49	-1,48	0,01
40	-1,96	-1,97	-0,01
50	-2,49	-2,46	0,03
60	-2,95	-2,91	0,04
70	-3,55	-3,54	0,01
80	-4,15	-4,10	0,05
90	-4,54	-4,58	-0,04
100	-5,08	-5,12	-0,04
110	-5,58	-5,55	0,03
120	-6,05	-5,98	0,07
Rozszerzona niepewność pomiaru	0,10	0,20	

Podane niepewności rozszerzone wzorcowania wzorca kreskowego określone zostały jako niepewności standardowe pomiaru pomnożone przez współczynnik rozszerzenia  $k = 2$ , przy poziomie ufności ok. 95%. Niepewności standardowe wyznaczono na podstawie rozkładu prawdopodobieństwa wartości wielkości wejściowych, opartego bądź na seriach obserwacji (metoda typu A) albo na analizie naukowej, bazując na wszystkich dostępnych źródłach informacji (metoda typu B), przypisując im odpowiednio rozkład normalny lub prostokątny [7]. Niepewności te zawierają czynniki pochodzące m.in. od: pozycjonowania kreski wzorca kreskowego, interferencyjnego pomiaru przemieszczenia karetki pomiarowej oraz właściwości mierzonego wzorca kreskowego [8].

Jednym z ważniejszych czynników wpływających na niepewność pomiaru wzorców kreskowych są błędy przemieszczenia stolika pomiarowego, wprowadzane przez jego ruchy kątowe [9,10]. Wiąże się to z regułą Abbego, która mówi, że maksymalną dokładność może być osiągnięta tylko wtedy, gdy wzorec odniesienia (interferometr) jest w linii z osią mierzonego wzorca kreskowego. Jeżeli pomiar przemieszczenia jest dokonywany w miejscu oddalonym o pewne przesunięcie od rzeczywistego punktu przemieszczenia, to odległość rzeczywista różni się od odległości zmierzonej.

W celu zbadania pochylenia kątowego stolika powietrznego wykonano pomiary, wykorzystując do tego celu interferometr laserowy z retroreflektorem do pomiarów kątowych, ustawionym na korpusie stolika powietrznego. Zasadę pomiaru, przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Zasada pomiaru kąta  
Fig. 6. Principle of the angle measurement

System pomiarowy mierzy względne zmiany długości  $L_1$  i  $L_2$  i oblicza kąt na podstawie zależności:

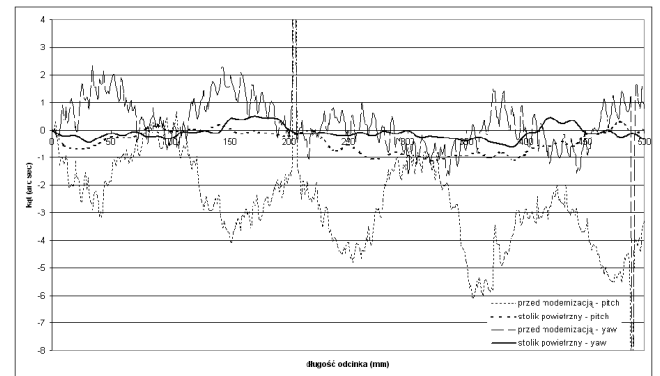
$$\alpha = \arcsin((L_1 - L_2)/D) \tag{1}$$

gdzie D jest odległością między punktami węzłowymi przyrządów narożnych reflektora. Dla małych kątów można przyjąć  $\sin \alpha \approx \alpha$  stąd

$$\alpha = (L_1 - L_2)/D \tag{2}$$

W związku z powyższym dokładność pomiaru kąta jest wprost proporcjonalna do dokładności odległości D oraz nierównoległości interferujących ze sobą wiązek [12].

Pomiary wykonano w płaszczyźnie pionowej (pitch) i poziomej (yaw), a wyniki pomiarów pochylenia kątowego stolika powietrznego w poszczególnych płaszczyznach porównano z wynikami pochylenia kątowego dotychczas wykorzystywanej karetki pomiarowej maszyny długościowej, co prezentuje rysunek 7.



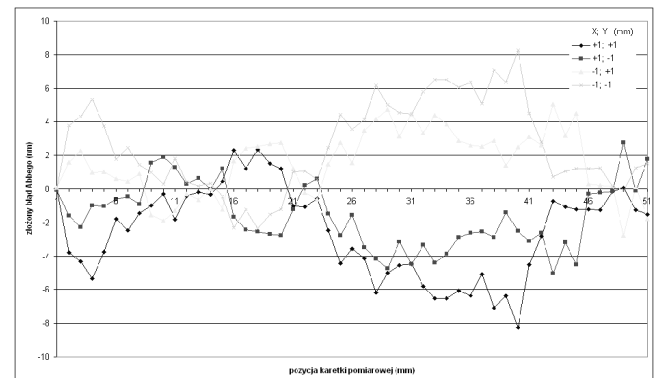
Rys. 7. Wykres pochylenia kątowego karetki pomiarowej w płaszczyźnie pionowej i poziomej przed i po modernizacji  
Fig. 7. Angular errors (pitch, yaw) of the measuring carriage before and after modernization

Do budżetu niepewności wartość błędu Abbego, związanego z ruchami kątowymi stolika powietrznego obliczono z zależności:

$$\delta l_{\text{Abbe}} = b \cdot \tan \alpha \tag{3}$$

gdzie:  $b$  – przesunięcie osi wzorca kreskowego względem osi pomiaru,  $\alpha$  - kąt pochylenia osi wzorca kreskowego względem osi wiązki pomiarowej interferometru laserowego.

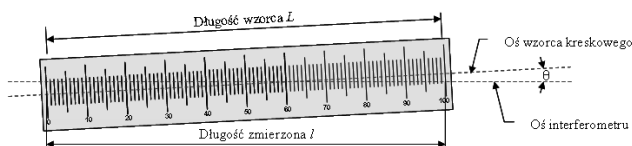
Podczas ustawiania wzorca kreskowego na stoliku pomiarowym, przyjęto wartość przesunięcia osi wzorca kreskowego względem osi pomiaru  $\pm 1$  mm, zarówno w kierunku poziomym (X) jak i pionowym (Y). W związku z tym niepewność związana z błędem Abbego, określono jako maksymalny błąd w różnych kombinacjach odchylenia od osi pomiaru [13], co przedstawia rysunek 8.



Rys. 8. Złożony błąd Abbego  
Fig. 8. Combined Abbe error

Wartość niepewności standardowej przy przyjęciu prostokątnego rozkładu prawdopodobieństwa wynosi 4,7 nm.

Kolejnym, równie ważnym, źródłem niepewności jest błąd cosinusowy, spowodowany ustawieniem interferometru laserowego względem wzorcowanego wzorca kreskowego. Powstaje on, gdy wiązka promieniowania laserowego jest nierównoległa do osi wzorca kreskowego i powoduje, że zmierzona odległość jest mniejsza niż odległość rzeczywista, co przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Błąd cosinusowy wzorca kreskowego  
Fig. 9. Cosine error caused by line scale misalignment

Gdy karetką pomiarową, z wyjustowanym na niej wzorcem kreskowym równoległe wzdłuż osi wiązki pomiarowej interferometru laserowego, zmienia położenie z punktu A do B, wiązka lasera nie pozostaje prostopadła do płaszczyzny ruchomego reflektora, ale przemieszcza się po jego powierzchni. Zmierzona przez interferometr odległość jest zatem mniejsza od rzeczywistej drogi pokonanej przez karetkę pomiarową, zgodnie z zależnością:

$$l = L \cdot \cos \theta \quad (4)$$

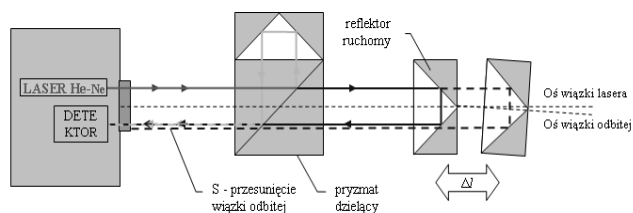
gdzie:  $l$  – odległość zmierzona przez interferometr,  $L$  – długość wzorcowanego wzorca kreskowego,  $\theta$  – kąt pochylenia osi wzorca kreskowego względem osi wiązki pomiarowej interferometru laserowego.

W związku z powyższym błąd cosinusowy  $\delta l_{\cos W}$  wzorca kreskowego zależny jest od jego długości, zgodnie z zależnością:

$$\delta l_{\cos W} = L \cdot (1 - \cos \theta) \quad (5)$$

Przed modernizacją pomiary pochylenia kąтового karetki pomiarowej względem interferometru, w płaszczyźnie poziomej i pionowej wykazały, że kąt  $\theta$  wynosi ok.  $12''$ . Taka wartość kąta powoduje niepewność ok.  $1 \cdot L$ , czyli  $0,12 \mu\text{m}$  dla wzorca o długości nominalnej 120 mm. Po zastosowaniu stolika powietrznego z prowadnicą granitową wartość kąta  $\theta$  zmniejszyła się 10x i wynosi ok.  $1,2''$ , co powoduje niepewność z tym związaną ok.  $0,01 \cdot L$ .

Istotnym problemem związanym z błędem cosinusowym jest przeprowadzenie dokładnego justowania interferometru przed wykonaniem pomiaru, w ten sposób by uzyskać możliwie najmniejsze przesunięcie powrotnej wiązki laserowej odbitej od reflektora interferometru  $S$ , co zilustrowano na rysunku 10.



Rys. 10. Błąd cosinusowy związany z adiustacją interferometru  
Fig. 10. Cosine error caused by interferometer misalignment

Błąd cosinusowy związany z justowaniem interferometru laserowego [3] wyrażony jest wzorem:

$$\delta l_{\cos l} = \frac{S^2}{8 \cdot L^2} \quad (6)$$

gdzie:  $S = 0,5 \text{ mm}$  – przesunięcie powrotnej wiązki laserowej odbitej od reflektora interferometru,  $L = 500 \text{ mm}$  – zmierzona odległość.

Niepewność standardowa przy przyjęciu prostokątnego rozkładu prawdopodobieństwa wynosi więc  $0,072 \mu\text{m}$  na metr przesunięcia.

## 4. Wnioski

W artykule przedstawiono modernizację stanowiska pomiarowego do wzorcowania wzorców kreskowych polegającą na zaprojektowaniu i wykonaniu stolika powietrznego, zbudowanego z prowadnicy granitowej i łożysk powietrznych, napędzanego przez silnik krokowy. Potrzeba takiej modernizacji wyniknęła po analizie raportu z porównań międzynarodowych EUROMET.L-K7 [14], dotyczących wzorcowania wzorców kreskowych, w których Laboratorium Długości uczestniczyło w 2007 r. Przegląd opisu stanowisk pomiarowych wykorzystywanych przez wiodące europejskie NMI, potwierdził konieczności zastąpienia dotychczas stosowanego przesuwu mechanicznego precyzyjnym przesuwem pneumatycznym, w celu uzyskania znacznie mniejszej niepewności wzorcowania wzorców kreskowych. Zastosowanie łożysk powietrznych, charakteryzujących się precyzją, bardzo niskim współczynnikiem tarcia, dobrą sztywnością i niezwykle dużą żywotnością, pozwoliło na zwiększenie odporności na wibracje, umożliwiło przesunięcie karetki pomiarowej przy użyciu minimalnej siły napędowej, a przede wszystkim znacznie zmniejszyło odchylenie od prostoliniowości. Konstrukcja umożliwiła zmniejszenie pochylenia kąтового stolika powietrznego w płaszczyźnie poziomej i pionowej do wartości  $1,2 \text{ arc sec}$ , a tym samym zmniejszenie niepewności związanej z błędami Abbego i cosinusowym, spowodowanymi kątowym pochyleniem karetki pomiarowej względem interferometru laserowego oraz mikroskopu z kamerą CCD. Modernizacja stanowiska komparatora interferencyjnego do wzorcowania wzorców kreskowych pozwoliła na zmniejszenie rozszerzonej niepewności pomiaru z  $0,36 \mu\text{m}$  do  $0,20 \mu\text{m}$ , dla wzorca kreskowego szklanego o długości nominalnej 120 mm.

## 5. Literatura

- [1] Kooops R., Mares A., Nieuwenkamp J.: A new standard for line-scale calibrations in the Netherlands. Mikroniek nr 4, 2010.
- [2] Sawabe M., Maeda F., Yamaryo Y., Simomura T., Saruki Y., Kubo T., Sakai H. and Aoyagi S.: A new vacuum interferometric comparator for calibrating the fine linear encoders and scales, *Precis. Eng.* Vol. 28, 320-328, 2004.
- [3] Air bearing application and design guide, New Way Precision, 2003.
- [4] HP 5528A – Laser Measurement System-User's Guide.
- [5] Bönsch G., Potulski E.: Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlen's formulae. *Metrologia*, vol. 35, 133-139.
- [6] PN-EN ISO/IEC 17025: 2005, Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących.
- [7] Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik. GUM, 1999 r.
- [8] Sosinowski P.: Źródła niepewności przy wzorcowaniu wzorców kreskowych na komparatorze interferencyjnym. *Metrologia – Biuletyn GUM*, 2011.
- [9] Koning R., Flugge J., Bosse H.: A method for the in situ determination of Abbe errors and their correction. *Measurement Science and Technology*, vol. 18, 2007.
- [10] Jakstas A., Kausinis S., Barauskas R., Kasparaitis A., Barakauskas A.: Investigation of dynamics-induced errors of long line scale calibration systems, *Measurement* 44, 976-987, 2011.
- [11] Koning R., Flüge J., Bosse H.: Achievement of sub nanometer reproducibility in line scale measurements with the Nanometer Comparator, *Proc. SPIE*, Vol.6518, 65183F, 2007.
- [12] Baldwin R.R., Truhe L.E., Woodruff D.C.: *Laser optical components for machine tool and other calibrations*, H-P Journal, 1983.
- [13] Lassila A.: MIKES fibre-coupled differentia dynamic line scale interferometer, *Measurement Science and Technology*, vol. 23, 2012.
- [14] Final Report EUROMET.L-K7 - Key Comparison: Calibration of line scales, *Metrologia* 49 (Tech. Suppl.).