

# Źródła niepewności przy wzorcowaniu wzorców kreskowych na komparatorze interferencyjnym

Piotr Sosinowski

Główny Urząd Miar – Zakład Długości i Kąta

W artykule przedstawiono budowę, posiadanego przez Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM, stanowiska umożliwiającego wzorcowanie wzorców kreskowych o długościach nominalnych od 1 mm do 500 mm, zasadę pomiaru oraz wskazano istotne źródła niepewności występujące podczas wzorcowania. W pracy skupiono się na trzech głównych składowych wpływających na niepewność pomiaru: powtarzalności wskazań, błędzie cosinusowym i sposobie pozycjonowania kreski. Przedstawiono możliwości ich zmniejszenia oraz działania podjęte w celu modernizacji jedyne w kraju stanowiska pomiarowego do wzorcowania wzorców kreskowych. Omówiony został udział Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM w porównaniach międzynarodowych EUROMET.L-K7 w zakresie wzorcowania wzorców kreskowych, których wstępne wyniki potwierdzają jego zdolności pomiarowe.

## Sources of uncertainty in calibration of the line scales using the interferometric comparator

The paper presents the construction of measuring station, which is used by the Length Laboratory of Department of Length and Angle of GUM and allows the calibrations of the line scales with nominal length from 1 mm to 500 mm, measuring principle and indicates the important sources of uncertainty occurring during the calibration. The paper focuses on three major components affecting the uncertainty of measurement: repeatability of results of measurements, cosine error and method of positioning lines, presents the possibility of reducing them, and steps taken to modernize the interferometric comparator for calibration of the line scales. At the end there has been presented the share of Length Laboratory of Department of Length and Angle of GUM in international comparisons EUROMET.L-K7 concerning the calibration of line scales, which preliminary results confirm its ability to make measurements.

## 1. Wprowadzenie

Wzorce kreskowe są ważnymi materialnymi wzorcami długości, używanymi do dokładnego pozycjonowania lub pomiarów w jednym, dwu lub trzech wymiarach. Pełnią istotną rolę w zapewnieniu spójności pomiarów, wykonywanych za pomocą przyrządów takich jak: mikroskopy uniwersalne, projektory pomiarowe, maszyny długościowe, lupy pomiarowe czy, 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. Artykuł ma na celu zaprezentowanie, posiadanego przez Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM, stanowiska umożliwiającego wzorcowanie wzorców kreskowych o długościach nominalnych od 1 mm do 500 mm oraz wskazanie istotnych źródeł niepewności występujących podczas ich wzorcowania.

## 2. Budowa stanowiska pomiarowego

Na rys. 1 przedstawiono komparator interferencyjny do wzorcowania wzorców kreskowych. Stanowisko to znajduje się w pomieszczeniu laboratoryjnym o kontrolowanej tem-

peraturze otoczenia w granicach  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ . Ustawione jest na specjalnej, odizolowanej od drgań podłoża, płycie oraz osłonięte obudową zabezpieczającą przed ruchami powietrza. Ponadto główne źródła ciepła umieszczone zostały poza obudową stanowiska.

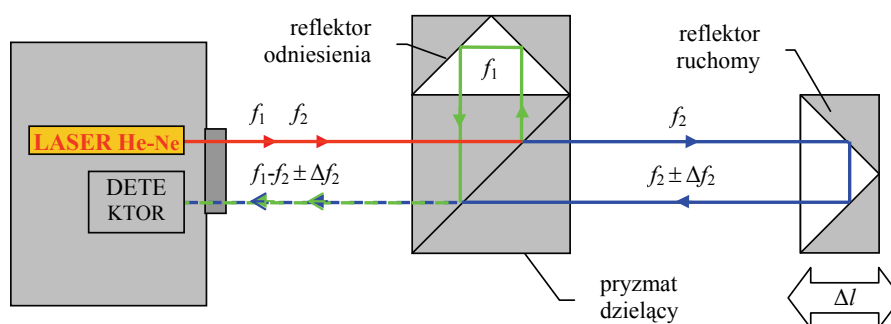


Rys. 1. Stanowisko komparatora interferencyjnego do wzorcowania wzorców kreskowych

Podstawę stanowiska stanowi masywne łożo maszyny długościowej, po którego poziomych prowadnicach porusza się zdalnie sterowana karetką pomiarową 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.

### 3. Zasada pomiaru

Zasadę pomiaru, wykorzystywaną podczas wzorcowania wzorców kreskowych na komparatorze interferencyjnym, przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Zasada pomiaru

Wiązka światła emitowanego przez dwuczęstotliwościowy laser He-Ne 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 [3].

#### 4. Niepewność pomiaru

Równanie pomiaru stosowane do wyznaczenia odchylenia długości zmierzonej od długości nominalnej wzorca kreskowego określa wzór:

$$d = l - L + l_t + l_E + \delta l_p + \delta l_{\text{poz}} + \delta l_r + \delta l_{\text{NL}} + \delta l_{\text{DP}} + \delta l_A + \delta l_{\text{cos}} + \delta l_{\kappa} + \delta l_{\text{supp}} \quad (1)$$

przy czym poszczególne zmienne powyższego wzoru zostały opisane w tabeli 1.

Dla nieskorelowanych wielkości wejściowych można zapisać równanie niepewności pomiaru w postaci:

$$u^2(d) = c_l^2 \cdot u^2(l) + c_L^2 \cdot u^2(L) + c_t^2 \cdot u^2(l_t) + c_E^2 \cdot u^2(l_E) + c_p^2 \cdot u^2(\delta l_p) + c_{\text{poz}}^2 \cdot u^2(\delta l_{\text{poz}}) + c_r^2 \cdot u^2(\delta l_r) + c_{\text{NL}}^2 \cdot u^2(\delta l_{\text{NL}}) + c_{\text{DP}}^2 \cdot u^2(\delta l_{\text{DP}}) + c_A^2 \cdot u^2(\delta l_A) + c_{\text{cos}}^2 \cdot u^2(\delta l_{\text{cos}}) + c_{\kappa}^2 \cdot u^2(\delta l_{\kappa}) + c_{\text{supp}}^2 \cdot u^2(\delta l_{\text{supp}}) \quad (2)$$

gdzie składowe niepewności wraz z odpowiednimi współczynnikami wrażliwości  $c_p$ , związane z poszczególnymi wielkościami wejściowymi, przedstawiono w tabeli 1. 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. Dla przejrzystości składowe te zostały pogrupowane na trzy kategorie źródeł niepewności pochodzących od: pozycjonowania kreski wzorca kreskowego, interferencyjnego pomiaru przemieszczenia karetki pomiarowej oraz właściwości mierzonego wzorca kreskowego.

W Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM opracowano arkusz kalkulacyjny umożliwiający szacowanie niepewności pomiaru wzorców kreskowych dla zmieniających się parametrów pomiaru. Niepewność rozszerzona wzorcowania wzorców kreskowych obliczona za jego pomocą i zgodnie z wytycznymi przedstawionymi w Przewodniku [5], przy poziomie ufności ok. 95 % i współczynniku rozszerzenia  $k = 2$ , wynosi:

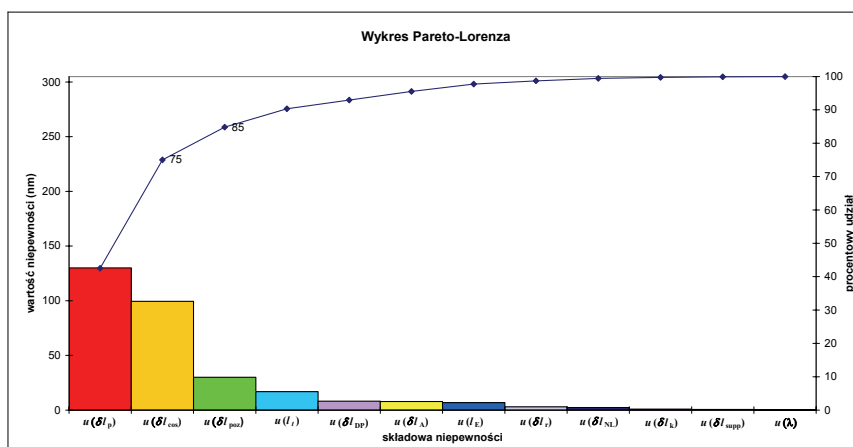
$$U = \sqrt{268^2 + (2 \cdot L)^2} \text{ nm} \quad (3)$$

gdzie  $L$  jest długością nominalną wzorca kreskowego wyrażoną w mm.

Tabela 1. Budżet niepewności wzorcowania wzorców kreskowych

| Składowa niepewności $u(x_i)$                  | Źródło niepewności                                      | Rozkład prawdopodobieństwa   | Współczynnik wrażliwości $c_i$ | $ c_i  \cdot u(x_i)$ (nm) |
|--|---|--|--------------------------------|---------------------------|
| <b>Pozycjonowanie kreski:</b>                  |   |  |                                |                           |
| $u(\delta l_p)$                                | <b>Powtarzalność</b>                                    | normalny   | 1                              | 130,00                    |
| $u(\delta l_{poz})$                            | <b>Pozycjonowanie kreski w bisektorze</b>               | normalny   | 1                              | 30,00                     |
| <b>Interferencyjny pomiar przemieszczenia:</b> |   |  |                                |                           |
| $u(\lambda)$                                   | <b>Długość fali promieniowania laserowego</b>           | normalny   | $L/\lambda$                    | 0,0019 L                  |
| $u(l_E)$                                       | <b>Współczynnik załamania powietrza:</b>                |  |                                |                           |
| $u(n_{air})$                                   | Przybliżenie matematyczne równania Edlana               | prostokątny  | L                              | 0,0100 L                  |
| $u(t_{air})$                                   | Temperatura powietrza                                   | normalny<br>prostokątny<br>prostokątny<br>prostokątny                | $-9,57E-07 \cdot L$            | 0,0341 L                  |
| $u(t_{airc})$                                  | wzorcowanie czujnika temp. powietrza                    |  |                                |                           |
| $u(t_{aird})$                                  | dryft czujnika temp. powietrza                          |  |                                |                           |
| $u(t_{airv})$                                  | zmiana temperatury powietrza w czasie                   |  |                                |                           |
| $u(t_{airg})$                                  | gradient temperatury powietrza                          |  |                                |                           |
| $u(p_{air})$                                   | Ciśnienie powietrza                                     | normalny<br>prostokątny  | $2,68E-09 \cdot L$             | 0,0155 L                  |
| $u(p_{airc})$                                  | wzorcowanie czujnika ciśnienia                          |  |                                |                           |
| $u(p_{aird})$                                  | dryft czujnika ciśnienia                                |  |                                |                           |
| $u(RH_{air})$                                  | Wilgotność powietrza                                    | normalny<br>prostokątny  | $-8,67E-09 \cdot L$            | 0,0501 L                  |
| $u(RH_{airc})$                                 | wzorcowanie miernika wilgotności                        |  |                                |                           |
| $u(RH_{aird})$                                 | dryft miernika wilgotności                              |  |                                |                           |
| $u(c_{CO_2})$                                  | Zawartość CO <sub>2</sub> w powietrzu                   | normalny<br>prostokątny  | $1,45E-10 \cdot L$             | 0,0084 L                  |
| $u(c_{CO_2c})$                                 | wzorcowanie miernika zawartości CO <sub>2</sub>         |  |                                |                           |
| $u(c_{CO_2d})$                                 | dryft miernika zawartości CO <sub>2</sub>               |  |                                |                           |
| $u(\lambda_{air})$                             | Długość fali w próżni                                   | normalny   | $-1,24E-05 \cdot L$            | 0,0229 L                  |
| $u(\delta l_p)$                                | <b>Rozdzielczość interferometru</b>                     | prostokątny  | 1                              | 2,9                       |
| $u(\delta l_{NI})$                             | <b>Nieliniowość interferometru</b>                      | prostokątny  | 1                              | 2,3                       |
| $u(\delta l_{DP})$                             | <b>Nieskompensowanie „drogi martwej”</b>                | normalny   | 1                              | 8,1                       |
| $u(\delta l_A)$                                | <b>Błąd Abbego</b>                                      | prostokątny  | 1                              | 7,8                       |
| $u(\delta l_{cos})$                            | <b>Błąd cosinusowy:</b>                                 |  |                                |                           |
| $u(\delta l_{cosl})$                           | związany z adiustacją interferometru                    | prostokątny  | L                              | 0,0180 L                  |
| $u(\delta l_{cosW})$                           | związany z adiustacją wzorca kreskowego                 | prostokątny  | L                              | 0,9934 L                  |
| <b>Właściwości wzorca kreskowego:</b>          |   |  |                                |                           |
| $u(l)$   | <b>Efekty temperaturowe:</b>                            |  |                                |                           |
| $u(\alpha)$                                    | Współczynnik rozszerzalności wzorca kreskowego          | prostokątny  | $\Delta t_s \cdot L$           | 0,0687 L                  |
| $u(\Delta t_s)$                                | Odchylenie temperatury wzorca kreskowego od 20 °C       | normalny<br>prostokątny<br>prostokątny<br>prostokątny<br>prostokątny | $\alpha \cdot L$               | 0,1532 L                  |
| $u(\Delta t_{sc})$                             | wzorcowanie czujników temp. materiału                   |  |                                |                           |
| $u(\Delta t_{sd})$                             | dryft czujników temp. materiału                         |  |                                |                           |
| $u(\Delta t_{sv})$                             | zmiana temperatury materiału w czasie                   |  |                                |                           |
| $u(\Delta t_{sg})$                             | gradient temperatury materiału                          |  |                                |                           |
| $u(\alpha) u(\Delta t_s)$                      | wyrazy wyższego rzędu                                   |  |                                |                           |
| $u(l_k)$                                       | <b>Efekt ściśliwości:</b>                               |  |                                |                           |
| $u(\kappa)$                                    | Współczynnik ściśliwości wzorca kreskowego              | prostokątny  | $\Delta p_s \cdot L$           | 0,0005 L                  |
| $u(\Delta p_s)$                                | Zmienność ciśnienia powietrza podczas pomiaru 101325 Pa | prostokątny  | $\kappa \cdot L$               | 0,0089 L                  |
| $u(\delta l_{supp})$                           | <b>Podparcie wzorca kreskowego</b>                      | normalny   | 1                              | 0,6                       |

Przeprowadzone w Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM badania składowych wpływających na niepewność pomiaru i ich analiza wskazały na trzy dominujące źródła niepewności: powtarzalność wskazań, błąd cosinusowy i sposób pozycjonowania kreski, co ilustruje rys. 3. Przedstawiona w postaci wykresu analiza Pareto-Lorenza pozwala stwierdzić, że ok. 80 % niepewności pomiaru powoduje tylko ok. 20 % źródeł niepewności (3 składowe), które wymagają szczególnej uwagi i podjęcia działań dążących do ich zmniejszenia.



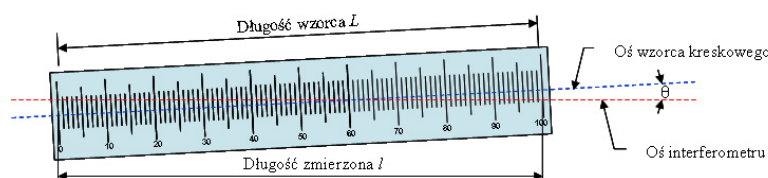
Rys. 3. Wykres procentowego udziału składowych niepewności w niepewności rozszerzonej

Z powyższego wykresu wynika, że główny udział w niepewności rozszerzonej wzorcowania wzorców kreskowych ma powtarzalność pomiaru, szacowana na podstawie  $n$  pomiarów odchylenia od długości nominalnej wzorca kreskowego. Niepewność standardowa obliczona jest, jako odchylenie standardowe eksperymentalne średniej, ze wzoru:

$$u(\delta l_{pow}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (d_k - \bar{d})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (4)$$

wynosi 130 nm i została oszacowana na podstawie 8. serii pomiarowych. Zmniejszenie tej wartości wiązałyby się z koniecznością wykonania większej liczby serii pomiarowych i tym samym ze wzrostem czasu potrzebnego na wykonanie dodatkowych pomiarów, co z kolei mogłoby spowodować zwiększenie wpływu na pomiar temperatury i czynników wpływających na pozycjonowanie kreski w bisektorze.

Drugim, 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. 4.



Rys. 4. Błąd cosinusowy

Gdy karetką pomiarową, z wyjustowanym na niej wzorcem kreskowym równolegle 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:

$$l = L \cdot \cos\theta \quad (5)$$

gdzie:

$l$  – odległość zmierzona przez interferometr,

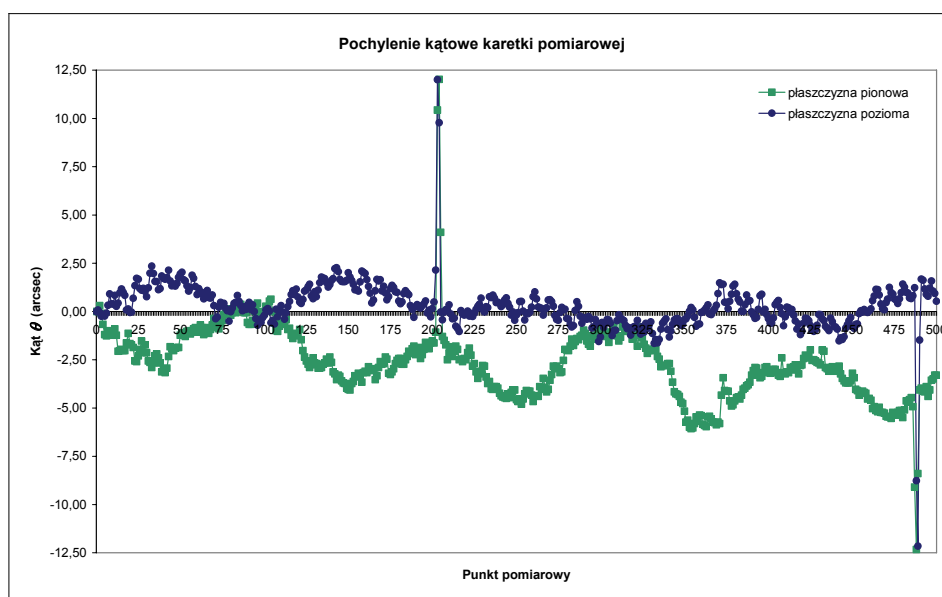
$L$  – długość wzorcowanego wzorca kreskowego,

$\theta$  – kąt pochylenia osi wzorca kreskowego względem osi wiązki pomiarowej interferometru laserowego.

Niepewność związana z pochyleniem kątowym  $\theta$  osi wzorca kreskowego względem osi pomiaru za pomocą interferometru laserowego  $u(\delta l_{\cos\theta})$ , przy przyjęciu prostokątnego rozkładu prawdopodobieństwa, wynosi:

$$u(\delta l_{\cos\theta}) = \frac{(1 - \cos\theta)}{\sqrt{3}} \cdot L \quad (6)$$

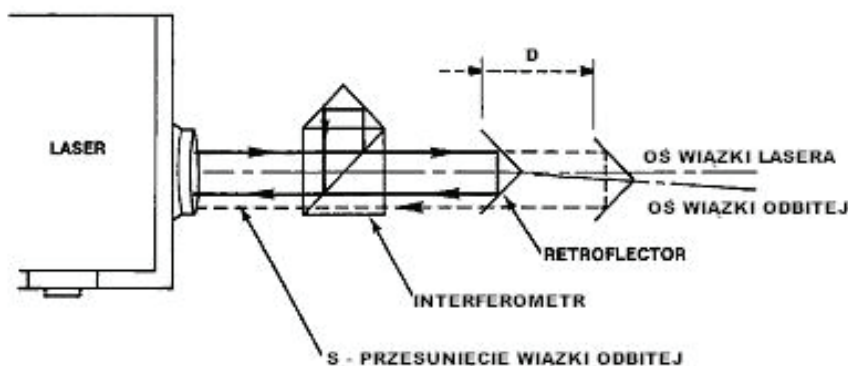
Na podstawie pomiarów pochylenia kąтового karetki pomiarowej względem interferometru, w płaszczyźnie poziomej i pionowej, kąt  $\theta$  oszacowano na ok. 12", co przedstawia rys. 5. Taka wartość kąta powoduje niepewność ok.  $1 \cdot L$ , czyli 100 nm dla wzorca o długości nominalnej 100 mm.



Rys. 5. Wykres pochylenia kąтового karetki pomiarowej w płaszczyźnie pionowej i poziomej

Jednym ze sposobów zmniejszenia błędu cosinusowego 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 rys. 6.





Rys. 6. Błąd cosinusowy związany z adiustacją interferometru

Błąd cosinusowy związany z justowaniem interferometru laserowego [4] wyrażony jest wzorem:

$$\frac{S^2}{8 \cdot D^2} \cdot L \quad (7)$$

gdzie:

$S = 0,5 \text{ mm}$  – przesunięcie powrotnej wiązki laserowej odbitej od reflektora interferometru,  
 $D = 1000 \text{ mm}$  – odległość reflektora od głowicy lasera.

Niepewność standardowa, przy przyjęciu prostokątnego rozkładu prawdopodobieństwa, wyniesie zatem:

$$u(\delta l_{\cos 1}) = \frac{S^2}{8 \cdot D^2 \cdot \sqrt{3}} \cdot L = \frac{0,5^2}{8 \cdot 1000^2 \cdot \sqrt{3}} \cdot L = 0,0180 L \text{ (nm)} \quad (8)$$

gdzie  $L$  w mm.

Znacznie istotniejszym problemem jest jednak nieprostoliniowość przesuwu karetki pomiarowej, która powoduje że w dowolnym punkcie pomiarowym wyjustowany względem niej wzorec jest pochylony pod różnym kątem. Aby to zminimalizować należałoby zastosować prowadnicę, o znacznie mniejszych błędach prostoliniowości. Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM podjęło już odpowiednie działania w tym kierunku i rozpoczęło modernizację przesuwu karetki pomiarowej poprzez zastosowanie prowadnicy granitowej z łożyskami powietrznymi. Łożyska te charakteryzują się precyzją, bardzo niskim współczynnikiem tarcia, dobrą sztywnością i niezwykle dużą żywotnością, co zwiększy odporność na wibracje, umożliwi przesunięcie karetki pomiarowej przy użyciu minimalnej siły napędowej, a przede wszystkim pozwoli na znaczne zmniejszenie odchylenia od prostoliniowości.

Kolejnym istotnym źródłem niepewności jest sposób pozycjonowania kreski w bisektorze, który obecnie polega na wzrokowej obserwacji podziałki wzorca na ekranie monitora i ręcznym wprowadzaniu kreski symetrycznie w jego obszar i zależy od kilku czynników takich jak: ostrość obrazu, oświetlenie, jakość kreski wzorca, powiększenie i wpływ obserwatora. Dla oszacowania niepewności, zmierzono 10 razy odległość między dwoma kolejnymi kreskami, uzyskując odchylenie standardowe eksperymentalne średniej:

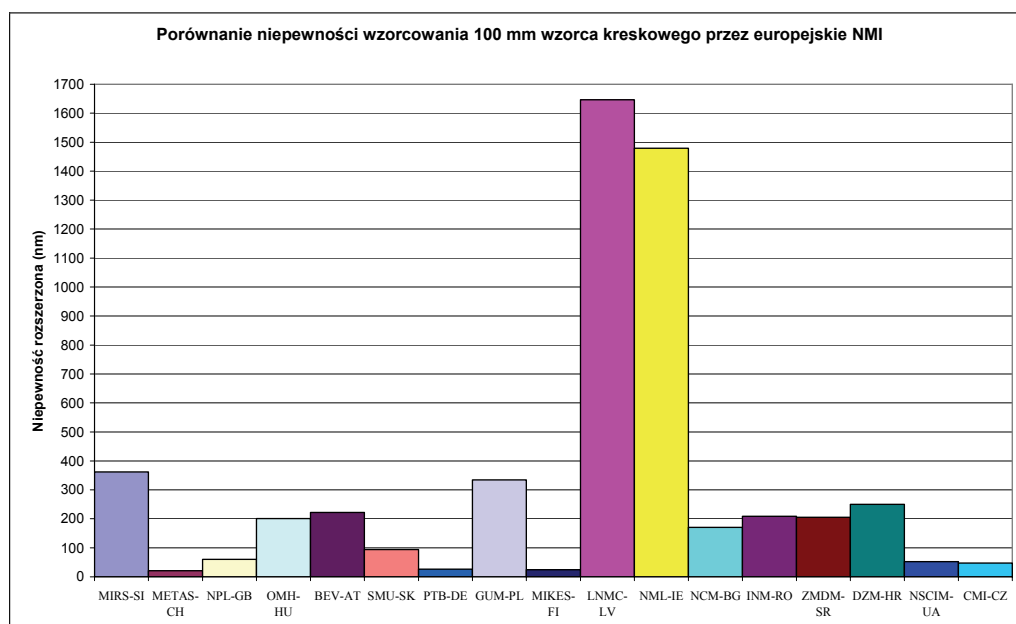
$$u(\delta l_{\text{poz}}) = 30 \text{ nm} \quad (9)$$

W roku 2009 podjęto się opracowania i zastosowania metody automatycznej detekcji środka kreski, opartej na numerycznym obliczaniu położenia środka kreski w zarejestrowanym obrazie podziałki wzorca, w celu wyeliminowania subiektywnej roli obserwatora, a tym samym zmniejszenia niepewności pomiaru związanej zarówno z pozycjonowaniem kreski, jak i z powtarzalnością uzyskiwanych wyników. Analiza obrazu kresek kilku rodzajów wzorców kreskowych wykazała, że głównymi czynnikami wpływającymi na dokładność wyznaczenia środka kreski są: powiększenie układu optycznego, sposób oświetlenia wzorca oraz czystość zarówno układu optycznego, jak i samego wzorca kreskowego. Wykazano, że stosowane boczne podświetlanie nieskolimowaną wiązką powoduje nierównomierność oświetlenia powierzchni wzorca i niesymetryczność otrzymanego profilu kreski, co jest przyczyną przesunięcia środka „ciężkości” profilu kreski i dodatkowego błędu pomiaru. Dodatkową nierównomierność rozkładu jasności w obrazie może powodować różna czułość elementów matrycy CCD stosowanej kamery. Ponadto układ detektora oraz układy formowania, przesyłania i odbioru sygnału video generują szумы, dające efekt „mrowienia się” obrazu, których poziom jest uzależniony od intensywności rejestrowanego obrazu.

Dalsze prace nad zmniejszeniem składnika niepewności związanej z pozycjonowaniem kreski będą kontynuowane po realizacji zakupu profesjonalnego mikroskopu z kamerą cyfrową.

## 5. Porównania międzynarodowe

W celu potwierdzenia zdolności pomiarowej, w lutym 2007 r., Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM wzięło udział w kluczowych porównaniach międzynarodowych EUROMET.L-K7 w zakresie wzorcowania wzorców kreskowych. Obiektem porównań był wzorec kreskowy o długości nominalnej 100 mm, wykonany ze szkła kwarcowego o małym współczynniku rozszerzalności cieplnej. W porównaniach tych, w grupie A, uczestniczyło siedemnaście Krajowych Instytucji Metrologicznych (NMI). Niepewność rozszerzoną wzorcowania poszczególnych uczestników przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Wykres niepewności rozszerzonej wzorcowania 100 mm wzorca kreskowego przez NMI



Analiza powyższego wykresu oraz opisów stanowisk pomiarowych poszczególnych uczestników porównań, potwierdzają przyjęty plan modernizacji stanowiska pomiarowego polegający na zastosowaniu stolika powietrznego do realizacji precyzyjnego przesuwu wzorca kreskowego oraz wykorzystaniu numerycznej detekcji środka jego kreski.

Wyniki zawarte w projekcie raportu z porównań potwierdzają zdolności pomiarowe Laboratorium w zakresie wzorcowania wzorców kreskowych i dają podstawę do rozszerzenia międzynarodowej listy kwalifikowanych usług, zamieszczanych w tabeli CMC, zgłaszanych przez Laboratorium Długości.

## Literatura

- [1] A. Sadowski, E. Miernik, J. Sobol: *Metrologia długości i kąta*. WNT, 1978.
- [2] W. Jakubiec, J. Malinowski: *Metrologia wielkości geometrycznych*. WNT, 1993.
- [3] G. Bönsch, E. Potulski: *Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlen's formulae*. *Metrologia*, vol. 35, 133-139.
- [4] HP 5528A – Laser Measurement System-User's Guide.
- [5] *Wyrażanie niepewności pomiaru*. Przewodnik. GUM 1999.
- [6] B. Hemming, I. Palosuo, A. Lassila: *Design of a calibration machine for optical two-dimensional length standards*. *Proceedings of SPIE*, vol. 4902, 670-678.
- [7] TaeBong Eom, JinWan Han: *A precision length measuring system for a variety of linear artefacts*. *Measurement Science and Technology*, vol. 12, 698-701.
- [8] M. Druzovec, B. Acko, A. Godina, T. Welzer: *Simulation of line scale contamination in calibration uncertainty model*. *International Journal of Simulation Modelling* 7 (3), 113-123.
- [9] Draft B Report EUROMET.L-K7 – Key Comparison: Calibration of line scale.