

Państwowy wzorzec jednostki kąta płaskiego

Katarzyna Nicińska i Joanna Przybylska

Główny Urząd Miar – Zakład Długości i Kąta

Państwowy wzorzec jednostki kąta płaskiego, znajdujący się w Głównym Urzędzie Miar, tworzą dwa stanowiska pomiarowe – stanowisko do odtwarzania jednostki w zakresie kąta pełnego oraz generator małych kątów, odtwarzający jednostkę kąta w zakresie $40'$. W ostatnich latach stanowisko do odtwarzania jednostki w zakresie kąta pełnego zostało zmodernizowane. W niniejszym artykule zaprezentowano budowę obu stanowisk, stosowane metody pomiarowe oraz omówiono składniki budżetów niepewności.

National Standard of the Plane Angle Unit

The National Standard of the Plane Angle Unit, which is located in the Central Office of Measures, consists of two measuring stations – the measuring station for reproducing of the round angle (360°) and the generator for small angles, which reproduces angles within the range of $40'$. Recently, the station for reproducing the round angle has been modernized. In this paper the two measuring stations, measuring methods and components of uncertainty budgets are described.

1. Wstęp

Państwowy wzorzec jednostki kąta płaskiego, utrzymywany w GUM, składa się z dwóch stanowisk pomiarowych: stanowiska pomiarowego do odtwarzania jednostki w zakresie kąta pełnego oraz stanowiska do odtwarzania jednostki w zakresie do $40'$ (generator małych kątów).

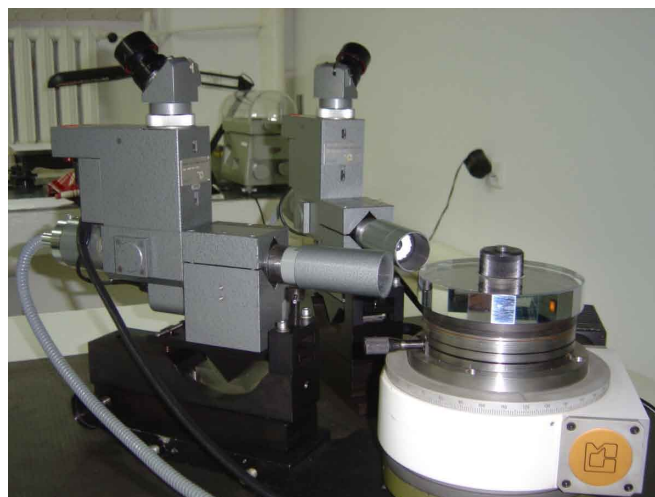
W ostatnich latach stanowisko do odtwarzania jednostki w zakresie kąta pełnego zostało zmodernizowane. Obecnie, w oczekiwaniu na pozytywne wyniki w porównaniach międzynarodowych i zatwierdzeniu zmian w polskiej części tabel CMCs, funkcjonują oba stanowiska pomiarowe do odtwarzania jednostki w zakresie kąta pełnego, przed i po modernizacji.

2. Stanowisko do odtwarzania jednostki kąta płaskiego w zakresie 360°

Stanowisko do odtwarzania jednostki kąta płaskiego w zakresie pełnego obrotu, przed modernizacją, składa się z dwóch mikroskopów fotoelektrycznych z oświetleniem światłowodowym, o rozdzielczości $0,025''$ i zakresie pomiarowym ($0 \div 40''$) oraz stołu obrotowego o rozdzielczości (wartości kroku) $0,001^\circ$. Stanowisko to przedstawione jest na rys. 1.

Jeden z mikroskopów nie zmienia swojego położenia w trakcie całego pomiaru; drugi z mikroskopów, po każdej kolejnej serii pomiarów jest obracany o kąt równy kątowi nominalnemu wzorcowanej pryzmy wielościennej. W pozycji wyjściowej, na początku pierwszej serii pomiarów, mikroskop „stały” ustawiony jest przed pierwszą powierzchnią pomiarową pryzmy, natomiast mikroskop „ruchomy” przed drugą powierzchnią. Przy takim ustawieniu mikroskopów, stół obrotowy z zamocowaną na nim pryzmą wielościenną wykonuje pełen obrót, w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu wskazówek zegara, z zatrzymaniem po wykonaniu obrotu o kąt równy wartości kąta nominalnego mierzonej pryzmy. Przy każdym zatrzymaniu z obu mikroskopów zbierane są dane i zapamiętywane w programie komputerowym. Po wykonaniu całego obrotu, mikroskop „ruchomy” przesuwany jest tak, aby

znalazł się przed trzecią powierzchnią pryzmy i, startując znowu od pierwszej powierzchni pryzmy, cała procedura jest powtarzana. Ostatnia seria pomiarowa wykonywana jest, gdy mikroskop „ruchomy” ustawiony jest naprzeciwko mikroskopu „stałego”, a kąt między mikroskopami równy jest 180° .



Rys. 1. Stanowisko do odtwarzania jednostki kąta płaskiego w zakresie 360° .

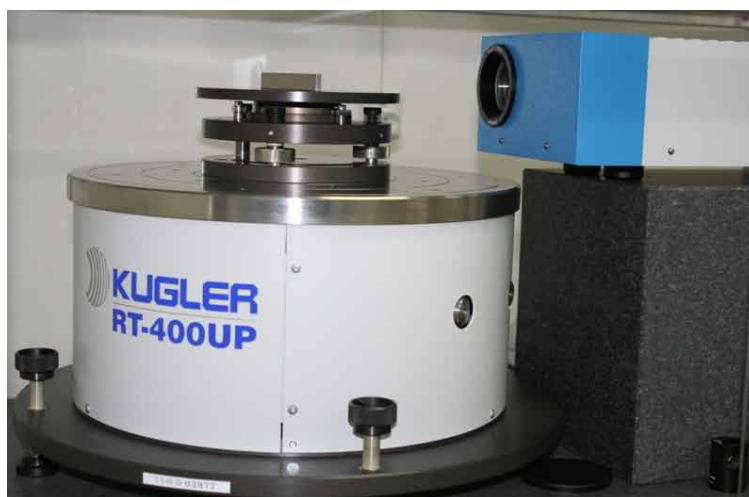
Ze wszystkich zebranych danych program komputerowy oblicza wartości błędów kątów pomiarowych w odniesieniu do pierwszej powierzchni pomiarowej. Wartości błędów kątów obliczane są tzw. metodą Cooka, opisaną szczegółowo w [1]. W metodzie tej program komputerowy rozwiązuje układy równań dla ustalonych kątów między mikroskopami, przy czym każde równanie odpowiada innemu kątowi między poszczególnymi powierzchniami pomiarowymi pryzmy. Metoda Cooka obliczania błędów kątów wykorzystuje zasadę, że suma wartości wszystkich kątów nominalnych pryzmy równa się 360° , natomiast suma wartości błędów kątów jest równa zero.

Stanowisko to służy jedynie do wzorcowania pryzm wielościennech (maksymalnie 36-ściennych) a najmniejsza możliwa do uzyskania rozszerzona niepewność pomiaru pryzm dla tego stanowiska wynosi $0,36''$. Na ostateczną wartość niepewności złożonej składa się tzw. błąd metody, obliczany wraz z obliczeniem wartości poszczególnych błędów kątów pomiarowych, na podstawie wzoru podanego przez Cooka, ponadto składnik związany z dryfem szczeliny pomiarowej, składnik związany ze wzorcowaniem mikroskopów oraz składnik związany z płaskością poszczególnych powierzchni pomiarowych pryzmy.

3. Zmodernizowane stanowisko do odtwarzania jednostki kąta płaskiego w zakresie obrotu pełnego

Zmodernizowane stanowisko do odtwarzania jednostki kąta płaskiego w zakresie 360° składa się z autokolimatora o wysokiej rozdzielczości ($0,005''$) i precyzyjnego stołu obrotowego z łożyskowaniem powietrznym o wartości kroku $0,002''$. Stanowisko to przedstawione jest na rys. 2.

Zmodernizowane stanowisko służy obecnie do wzorcowania pryzm wielościennech i przywieralnych płytek kątowych. W przyszłości służyć będzie także do wzorcowania autokolimatorów oraz enkoderów.



Rys. 2. Zmodernizowane stanowisko do odtwarzania jednostki kąta płaskiego w zakresie 360°.

Zasada pomiaru pryzm wielościennych na zmodernizowanym stanowisku polega na wykonaniu serii pomiarowych w ilości równej liczbie ścian wzorcowanej pryzmy. Pierwszą serią pomiarową wykonuje się rozpoczynając od pierwszej powierzchni pomiarowej pryzmy, wykonując pełen obrót, tzn. zbierając odczyty z autokolimatora na każdej powierzchni. Kolejne serie wykonywane są po obróceniu pryzmy o wartość kąta nominalnego, tzn. druga seria rozpoczyna się od drugiej ściany pryzmy itd. Wyniki pomiarów pryzm wielościennych obliczane są dwiema metodami.

Jedną z nich to tzw. metoda rozetowa, podczas której wyznaczane są jednocześnie błędy stołu obrotowego i pryzmy wielościennej w n jednakowych przedziałach pomiarowych, gdzie n to liczba powierzchni pomiarowych mierzonej pryzmy.

Pomiar polega na pomiarze sumy odchyłeń kątowych we wszystkich $n \times n$ położeniach obrotu pryzmy wielościennej względem stołu obrotowego. Matematycznie pomiary te opisują układ równań z n^2 równaniami i $2n$ niewiadomymi – błędy stołu i pryzmy w n przedziałach pomiarowych. Odchylenia kątowe mierzone są za pomocą autokolimatora.

I tak, na przykład, dla pryzmy 4-ściennej realizowane są 4 serie pomiarowe. W pierwszej serii pomiarowej pierwsza ściana pryzmy odpowiada położeniu zerowemu stołu obrotowego. W takim wzajemnym położeniu pryzmy i stołu realizowany jest pełen obrót z krokiem równym kątowi nominalnemu pryzmy. Autokolimator zbiera dane pomiarowe z każdej ściany pryzmy. W drugiej serii położeniu zerowemu stołu odpowiada druga ściana pryzmy, itd.

Schemat macierzy do obliczania błędów stołu obrotowego (a_i) i pryzmy (b_j), dla pryzmy 4-ściennej, jest przedstawiony na rys. 3.

Układ równań pomiarowych dla I serii przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} a_1 - b_1 &= D_{11} - D_{00} \\ a_2 - b_2 &= D_{22} - D_{11} \\ a_3 - b_3 &= D_{33} - D_{22} \\ a_4 - b_4 &= D_{00} - D_{33} \end{aligned}$$

gdzie D_{00} , D_{11} , D_{22} , D_{33} to wskazania autokolimatora na kolejnych ścianach pryzmy.

I seria

	a₁	a₂	a₃	a₄	Suma wierszy
b₁	a ₁ - b ₁	a ₂ - b ₁	a ₃ - b ₁	a ₄ - b ₁	-4 \bar{b}_1
b₂	a ₁ - b ₂	a ₂ - b ₂	a ₃ - b ₂	a ₄ - b ₂	-4 \bar{b}_2
b₃	a ₁ - b ₃	a ₂ - b ₃	a ₃ - b ₃	a ₄ - b ₃	-4 \bar{b}_3
b₄	a ₁ - b ₄	a ₂ - b ₄	a ₃ - b ₄	a ₄ - b ₄	-4 \bar{b}_4
Suma kolumn	4 \bar{a}_1	4 \bar{a}_2	4 \bar{a}_3	4 \bar{a}_4	

Rys. 3. Schemat macierzy do obliczania błędów stołu obrotowego (a_i) i pryzmy (b_j) dla pryzmy 4-ściennej.

Układ równań dla drugiej serii, w której położeniu zerowemu stołu odpowiada druga ściana pryzmy przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} a_1 - b_2 &= D_{12} - D_{01} \\ a_2 - b_3 &= D_{23} - D_{12} \\ a_3 - b_4 &= D_{30} - D_{23} \\ a_4 - b_1 &= D_{01} - D_{30} \end{aligned}$$

gdzie D_{01} , D_{12} , D_{23} , D_{30} są wskazaniem autokolimatora na kolejnych ścianach pryzmy, przy przesuniętym położeniu pryzmy względem stołu o kąt nominalny pryzmy.

Równania dla kolejnych serii pomiarowych tworzy się analogicznie. W kolejne pola macierzy wstawia się odpowiednie różnice wskazań autokolimatora.

Według definicji, suma wszystkich błędów stołu obrotowego i pryzmy wielościennej jest równa zero

$$\sum_{i=1}^n a_i \equiv 0 \quad \sum_{j=1}^n b_j \equiv 0$$

Stąd otrzymuje się z macierzy jako średnią arytmetyczną sumy kolumn i wierszy błędy stołu i pryzmy.

Błędy stołu obrotowego:

$$\bar{a}_i = \frac{1}{n} \cdot (\text{sumy różnic wskazań autokolimatora w } i. \text{ kolumnie})$$

Błędy pryzmy wielościennej:

$$\bar{b}_j = -\frac{1}{n} \cdot (\text{sumy różnic wskazań autokolimatora w } j. \text{ wierszu})$$

Wszystkie błędy dla pryzmy wielościennej są wolne od błędów stołu. Sposób tworzenia równań i macierzy pomiarowych opisany jest w artykule [2].

Drugim sposobem obliczania wyników pomiarów pryzm wielościennej jest tzw. metoda „składana”. W metodzie tej każdą serię pomiarową traktuje się jak bezpośredni pomiar pryzmy wielościennej. W pierwszym „kroku” obliczane są błędy kątów dla poszczególnych kolejnych przedziałów pomiarowych. Następnie wyniki „przesuwane” są tak, aby w każdej serii pomiarowej na pierwszej pozycji znalazły się wartości otrzymane dla prze-

działu $0^\circ \div m^\circ$, gdzie m to wartość nominalna kąta pomiarowego mierzonej przyzmy. Z tak uzyskanych wyników obliczane są dla każdej serii wartości skumulowanych błędów kąta. Ze wszystkich wyników składowych obliczana jest wartość średnia i ona jest ostatecznym wynikiem pomiarów.

Metoda pomiaru przywieralnych płytek kątowych jest inna. Wykonywane są zawsze cztery serie pomiarowe, po dwie serie dla każdego kierunku obrotu, dla dwóch różnych położeń płytki na stoliku pomiarowym. Jako wynik podawana jest wartość średnia z wartości otrzymanych w czterech seriach.

Budżet niepewności, zarówno dla przyзм wielościennych jak i dla płytek kątowych wzorcowanych, na zmodernizowanym stanowisku do odtwarzania jednostki kąta płaskiego ma takie same składniki, pochodzące z różnych źródeł, uwzględniające: maksymalne odchylenie kwadratowe średniej, rozdzielczość precyzyjnego stołu obrotowego, rozdzielczość autokolimatora, maksymalny błąd wskazań autokolimatora, niepewność wyznaczenia błędów wskazań autokolimatora, płaskość ścian przyzmy lub płytki, niecentryczność ustawienia, wpływ piramidalności. Najmniejsza do uzyskania rozszerzona niepewność pomiaru przyзм wielościennych i płytek kątowych przywieralnych wynosi $0,07'$.

4. Generator małych kątów

Generator małych kątów jest stanowiskiem do odtwarzania jednostki kąta w zakresie $40'$. Zasada działania generatora oparta jest na zasadzie liniału sinusowego. Prosty liniał powierzchniowy oparty jest na dwóch podporach: stałej i ruchomej. Zmiana kąta pochylecia liniału realizowana jest za pomocą silnika prądu stałego. Wielkość przemieszczenia podpory ruchomej mierzona jest metodą bezpośrednią za pomocą interferometru laserowego. Program komputerowy wyświetla na monitorze wartość kąta, o jaki został pochylony liniał. Na generatorze małych kątów wzorcowane są autokolimatory fotoelektryczne i poziomnice elektroniczne o dużej rozdzielczości. Najmniejsza możliwa do uzyskania rozszerzona niepewność pomiarów na tym stanowisku wynosi $0,3''$. Wielkościami wejściowymi w budżecie niepewności są: wskazanie autokolimatora lub poziomnicy elektronicznej oraz wskazanie generatora. Niepewność autokolimatora lub poziomnicy związana ze wskazaniami przyrządu składa się z odchylenia standardowego średniej oraz niepewności wynikającej z roz-



Rys. 4. Generator małych kątów.

dzielczości wzorcowanego przyrządu. Natomiast ze wskazaniem generatora związana jest niepewność standardowa obliczana na podstawie wyników badań stanowiska. Generator małych kątów przedstawiony jest na rys. 4.

5. Podsumowanie

Zmodernizowane stanowisko państwowego wzorca jednostki kąta płaskiego realizującego odtwarzanie jednostki w zakresie pełnego kąta obrotu, działające od końca 2005 roku, wciąż wymaga podejmowania kolejnych działań zmierzających do jego pełnego wdrożenia. Pełne wdrożenie nowego stanowiska oznaczać będzie całkowite wyłączenie z eksploatacji obecnego stanowiska. Jednym z działań jest udział w porównaniach międzynarodowych. Takie porównania przeprowadzono na przełomie lat 2008/2009. Były to porównania w ramach projektu SIM.L-K3/2008, gdzie obiektem porównań była pryzma 12-ścienna i 4 płytki kątowe przywieralne.

Prowadzone są także prace nad opracowaniem metody pomiaru autokolimatorów na zmodernizowanym stanowisku. Na podobnych stanowiskach wzorcowane są autokolimatory w zagranicznych instytutach metrologicznych. Generator małych kątów pozwala obecnie na wzorcowanie autokolimatorów o rozdzielczości nie większej niż 0,05", gdzie na rynku dostępne są już autokolimatory o rozdzielczości nawet 0,005". Laboratorium Kąta przystąpiło do projektu EURAMET.L-K3.2009* (porównania międzynarodowe autokolimatorów), a wzorcowanie przyrządów odbędzie się, zgodnie z harmonogramem porównań, w styczniu 2011 r.

W przypadku uzyskania pozytywnych wyników dokonana zostanie zmiana zapisów w tabeli CMCs dotycząca wzorcowania pryzm wielościennej, płytek kątowych i autokolimatorów.

Literatura

- [1] Cook A. H.: *The calibration of circular scales and precision polygons*, British Journal of Applied Physics, nr 5, str. 367-370, 1954.
- [2] Noch R., Steiner O.: *Die Bestimmung von Kreisteilungsfehlern nach einem Rosettenverfahren*. Z. Instr. 74, Heft 10, 1966.