

JERZY GLIWINSKI

389.16

Odtwarzanie i przekazywanie jednostki kąta płaskiego za pomocą powierzchniowych i kreskowych wzorców kąta

W naukach technicznych i przyrodniczych, np. w geodezji, astronomii, optyce, budownictwie lądowym i wodnym, niezbędne są różnego rodzaju przyrządy do pomiaru kąta, w których miary kąta, stanowiące wzorzec porównawczy odtwarzane są przez podziałki rozmieszczone na kole. Takie podziałki mogą być wykonane bądź w postaci powierzchni bądź w postaci kresek. Podziałki powierzchniowe odtwarzane są przez koła zębate, tarcze podziałowe z rowkami i otworami, jak również przez pryzmy wielościenne. Podziałki kreskowe wykonywane na kręgach podziałowych zwanych limbusami stosowane są jako wzorce kąta w licznych przyrządach pomiarowych jak goniometry, optyczne głowice i stoły podziałowe oraz teodolity.

W celu zabezpieczenia jednolitości i prawidłowości pomiarów kąta w gospodarce narodowej w Polskim Komitecie Normalizacji i Miar zostało wykonanych szereg prac naukowo-badawczych mających na celu stworzenie podstawowego wzorca jednostki kąta płaskiego oraz opracowanie metod badania powierzchniowych i kreskowych wzorców kąta. W wyniku tych prac zbudowano wzorcowe stanowisko pomiarowe, pozwalające na badanie zarówno powierzchniowych (pryzm wielościennych), jak i kreskowych (limbusów) wzorców kąta.

W skład stanowiska wchodzi:

1. Zespół dwóch autokolimatorów

- autokolimator fotoelektryczny o wartości działki elementarnej $0,1''$,
- autokolimator wizualny o wartości działki elementarnej $0,25''$.

Jeden autokolimator zamocowany jest na stałe, drugi natomiast na obrotowym ramieniu z możliwością unieruchamiania w dowolnym miejscu.

2. Zespół dwóch mikrometrycznych mikroskopów o powiększeniach $30\times$ lub $300\times$, działkach elementarnych odpowiednio $1,0\ \mu\text{m}$ i $4,3''$ lub $0,14\ \mu\text{m}$ i $0,24''$.

3. Urządzenie obrotowe ze stołem krzyżowym do mocowania badanych wzorców kąta.

Dla zabezpieczenia odpowiednich warunków pomiaru stanowisko zbudowane zostało na specjalnie do tego celu wykonanym fundamencie odizolowanym od fundamentów budynku i znajduje się w pomieszczeniu o podwójnych ścianach, zapewniających stabilizację temperatury w granicach $\pm 1^\circ\text{C}$.

Jako wyjściowe wzorce kąta płaskiego stosowane są obecnie pryzmy wielościenne. Pryzmy wielościenne są wykonywane ze szkła, kwarcu lub stali w postaci graniastosłupów prostych, których ściany boczne stanowią powierzchnie miernicze. Zwykle powierzchni tych jest od 6 do 72. Rozróżniane są pryzmy wielościenne regularne o tych samych wartościach nominalnych wszystkich realizowanych kątów oraz pryzmy wielościenne nieregularne o różnych wartościach nominalnych kątów.

Wyjściowymi wzorcami kąta w PKNiM są dwie pryzmy kwarcowe 24 i 36-ścienne odpowiadające następującym wymaganiom:

- odchylenie kątów środkowych od wartości nominalnej $\pm 4''$,
- niepłaskość powierzchni mierniczych $\leq 0,05 \mu\text{m}$,
- piramidalność powierzchni mierniczych $\leq 5''$,
- nieprostotałość powierzchni mierniczych do powierzchni podstawy $\leq 5''$,
- chropowatość powierzchni mierniczych $\nabla 14$,
- niepłaskość powierzchni podstawy i górnej powierzchni niemierniczej $\leq 1 \mu\text{m}$,
- nierównoległość górnej powierzchni niemierniczej do powierzchni podstawy $\leq 1 \mu\text{m}$.

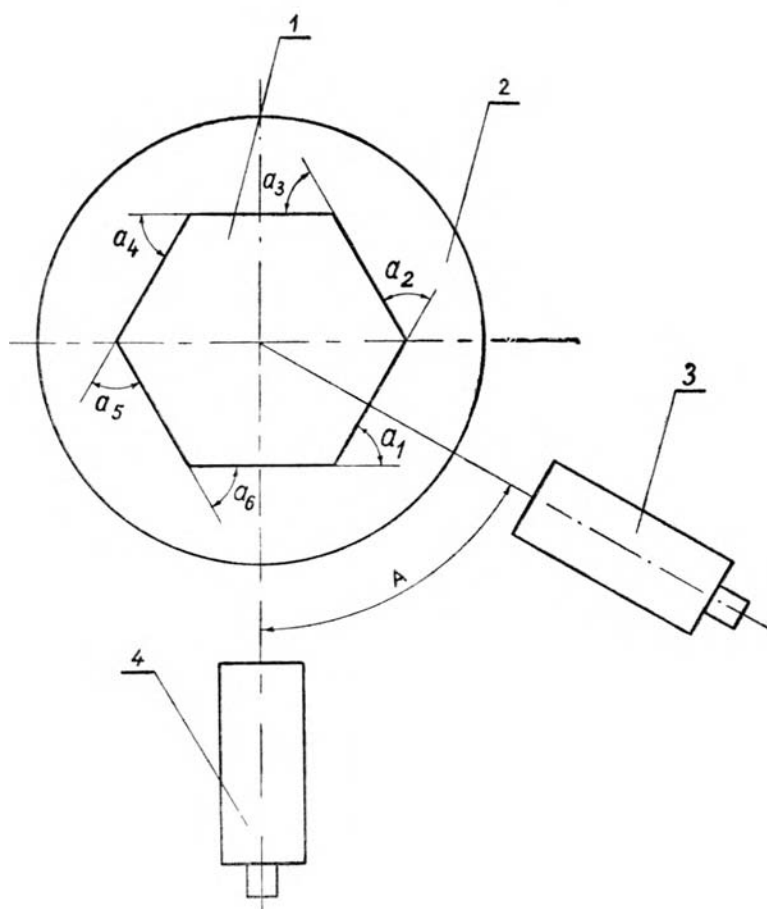
Powierzchnie miernicze są metalizowane.

Badanie pryzm wielościennej na zbudowanym stanowisku wzorcowym odbywa się tzw. metodą bezwzględną opartą na własności, że suma wszystkich środkowych kątów pryzmy wielościennej z zasady jest dokładnie równa 360° , a suma ich odchyłeń od wartości nominalnych jest równa zeru.

Metoda bezwzględna polega na kolejnym wzajemnym porównywaniu kątów środkowych za pomocą dwóch autokolimatorów (rys. 1). Pryzmę wielościennej i ustawia się na stoliku 2 urządzenia obrotowego w ten sposób, aby powierzchnie pryzmy były prostopadłe do osi pierwszego autokolimatora 3. Względem powierzchni pryzmy ustawia się drugi autokolimator 4 tak, aby kąt A między osiami autokolimatorów był równy kątowi między sąsiednimi powierzchniami wielościennej pryzmy i dokonuje się odczytów na podziałkach obu autokolimatorów. Następnie stół z pryzmą obraca się stopniowo tak, aby w polu widzenia autokolimatorów można było zaobserwować obrazy autokolimacyjne powstałe od następnych kolejnych powierzchni do pełnego obrotu pryzmy. W ten sposób wykonuje

się $n/2$ serii pomiarów (gdzie n liczba powierzchni mierniczych pryzmy). Kąt między autokolimatorami przy przechodzeniu od jednej serii do drugiej zmienia się

$$\text{od } A_1 = \frac{360^\circ}{n} \quad \text{do} \quad A_{n/2} = 180^\circ.$$



Rys. 1

Na podstawie wyznaczonych odchyłeń kątów pryzmy wielościennej od wartości stałego kąta między osiami autokolimatorów zestawia się następujący układ równań obserwacji

$$a_i - A = d_i, \quad (1)$$

gdzie:

a_i — wartości kątów pryzmy,

A — wartość stałego kąta,

d_i — zmierzone wartości odchyłeń.

Przez rozwiązanie układu (1) otrzymuje się dla każdej serii wartości odchyłeń kątów pryzmy od ich wartości nominalnej wyrażone wzorem

$$\gamma_i = d_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i, \quad (2)$$

Ostateczną wartość odchylenia kąta od wartości nominalnej oblicza się jako średnią arytmetyczną

$$\gamma_{\text{sr}} = \frac{\sum_{i=1}^{n/2} \gamma_i}{n/2}. \quad (3)$$

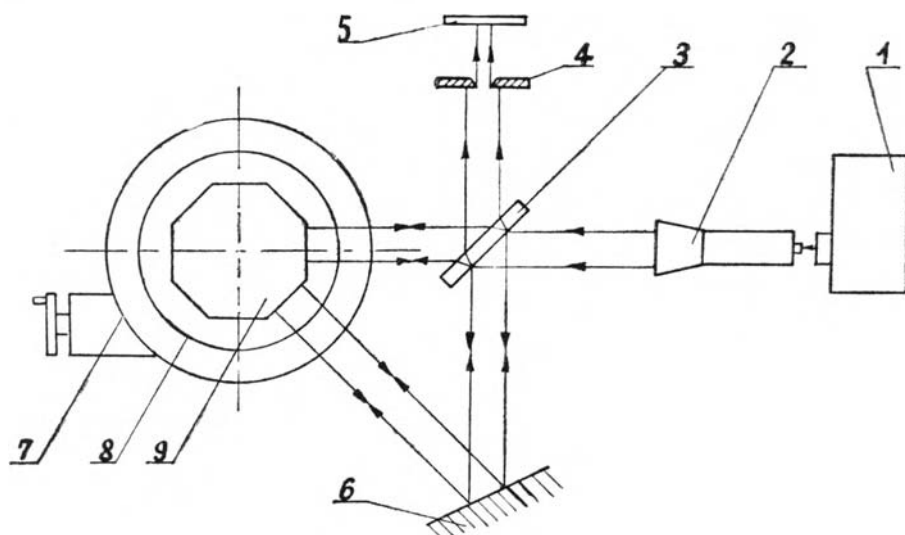
Oprócz opisanej metody bezwzględnej do badania pryzm stosuje się również tzw. metodę Cooka, w której sposób przeprowadzania badań jest podobny do opisanej wyżej metody bezwzględnej, inny natomiast jest sposób obliczenia wartości odchyłeń kątów pryzmy od ich wartości nominalnych, gdyż stosuje się metodę najmniejszych kwadratów. Przy użyciu autokolimatorów można również przeprowadzać jednoczesne wzorcowanie dwóch pryzm wielościennych, polegające na wzajemnym porównaniu wszystkich kątów obu pryzm we wszystkich możliwych kombinacjach wzajemnego położenia.

Należy w tym miejscu zaznaczyć, że jeszcze przed ogłoszeniem metody Cooka w byłym Głównym Urzędzie Miar Doc. Jerzy Jasnorzewski opracował różnicową autokolimacyjną metodę wyznaczania poprawek kątów, która została zastosowana do badania kątów podwójnego pryzmatu Köstera.

Oprócz metod autokolimacyjnych w PKNiM stosowana jest interferencyjna metoda bezpośredniego wzorcowania pryzmy wielościennej, której zasada jest przedstawiona na rysunku 2.

Odchylenia kątów od ich wartości nominalnej otrzymuje się na podstawie analizy serii obrazów interferencyjnych uzyskanych z odpowiednich par powierzchni mierniczych spełniających kolejno rolę zwierciadeł końcowych w interferometrze Michelsona. Jako źródło światła zastosowano laser helowo-neonowy firmy Spectra-Physics o stabilizowanej długości fali. Z jednej serii zdjęć obrazów interferencyjnych można uzyskać jednocześnie informacje o błędach kątów pryzmy wielościennej, o jej piramidalności oraz o błędach płaskości powierzchni mierniczych.

Wymienione metody pomiaru kątów pryzm wielościennych pozwalają na uzyskanie dokładności rzędu $\pm 0,2''$. Niedokładność ta może być zmniejszona do wartości $\pm 0,05''$ przez zastąpienie obu autokolimatorów wizualnych autokolimatorami fotoelektrycznymi.



Rys. 2

Oprócz pryzm wielościennych stosowane są również jako wzorce kąta limbusy niewmontowane, odpowiadające następującym wymaganiom:

- materiał szkło optyczne,
- średnica zewnętrzna 250 mm,
- grubość 20 mm,
- szerokość kresek 6—7 μm ,
- działka elementarna 1° ,
- średni błąd podziału $1''$.

Badanie błędów kresek limbusów niewmontowanych jest przeprowadzane na zbudowanym stanowisku wzorcowym metodami porównawczymi lub atestacji.

W pierwszym przypadku wielościenna pryzma wykorzystywana jest jako wzorec kontrolny, w którym znane są dokładnie wartości kątów. Różnice między sprawdzanymi i rzeczywistymi wartościami kątów określają błędy podziału limbusa. W drugim przypadku korzysta się z jednego kąta między dwoma powierzchniami pryzmy i mierzy się go według spe-

cialnego programu w różnych częściach sprawdzanego limbusa. Przy tym dokładna wartość kąta pryzmy może być nieznana.

Metoda ta może być również stosowana do badania błędów podziału teodolitów. W tym przypadku podstawowa różnica tego sposobu od znanej metody Heuvelinka polega na tym, że zamiast pomiaru kąta utworzonego przez dwa kolimatory mierzy się środkowy kąt między powierzchniami pryzmy wielościennej posługując się autokolimatorem. Przy tym niedokładność pomiaru za pomocą autokolimatora jest mniejsza (przy zastosowaniu autokolimatora wizualnego AK 0,25 błąd średni $\sigma = \pm 0,2''$) niż niedokładność naprowadzania lunety teodolitu na kolimator ($\sigma > 0,5''$).

Inną z metod stosowaną do badania kontrolnych limbusów niewymontowanych jest metoda rozetowa Brunsza. W metodzie tej badane są jednocześnie limbus z pryzmą wielościenną w ten sposób, że liczba n kątów podziałki limbusa jest porównywana z taką samą liczbą n kątów pryzmy w n możliwych wzajemnych położeniach. Mając $n \cdot n$ zmierzonych wartości oblicza się błędy poszczególnych kresów lub błędy średnicowe dla limbusa oraz błędy kątów dla pryzmy wielościennej.

Określenie jednak tą metodą błędów nawet ograniczonej liczby średnic jest związane z obszerną pracą obserwacyjną i rachunkową. W związku z tym powszechne stosowanie tej metody ze względów technicznych i ekonomicznych jest nieuzasadnione.

W związku z tym w PKNiM została opracowana metoda badania limbusów niewymontowanych z błędami wynikającymi z mimośrodowości, z jaką badany limbus zamocowany jest na stole stanowiska pomiarowego. Następnie eliminuje się błędy spowodowane mimośrodowością w taki sposób, że pozostają tylko błędy podziału limbusa.

W celu zapewnienia jednolitości pomiarów kątowych zostało opracowane w ramach RWPG zalecenie nr RS 1922-69 dotyczące układu sprawdzania narzędzi do pomiarów kąta. Przy opracowywaniu tego zalecenia brali udział specjaliści z instytutów metrologicznych wszystkich krajów członkowskich RWPG.

Układ sprawdzania pokazuje drogę przekazywania jednostki kąta płaskiego, odtwarzanego na opisanym wyżej wzorcowym stanowisku pomiarowym za pomocą wielościennych pryzm oraz autokolimatorów, od wzorców podstawowych poprzez wzorce niższych rzędów, narzędzia pomiarowe kontrolne do narzędzi pomiarowych użytkowych. Przedstawia on hierarchię wzorców, podając jednocześnie metody przekazywania poprawnych wartości wielkości.

Wzorzec podstawowy realizowany jest przez omówione już wyżej

- 36-ścienną pryzmę kwarcową,
- autokolimacyjne stanowisko wzorcowe.

Jako wzorce i narzędzia kontrolne przyjęto pryzmy wielościenne, limbusy niewmontowane, płytki kątowe, autokolimatory, goniometry i egzaminatory, badane metodami bezwzględными, bezpośrednimi, pośrednimi i porównawczymi.

W zależności od dokładności metody, przyjętej do przekazywania wartości kątów, a także w zależności od przeznaczenia wzorce i narzędzia kontrolne podzielone są na cztery rzędy. Niedokładności badania wzorców i narzędzi kontrolnych w tych rzędach nie powinny być większe niż:

$\pm 0,05''$	do $\pm 0,5''$	dla I rzędu,
$\pm 0,3''$	do $\pm 1,5''$	dla II rzędu,
$\pm 2,0''$	do $\pm 3,0''$	dla III rzędu,
$\pm 5,0''$		dla IV rzędu.

Za pomocą wzorców i narzędzi kontrolnych sprawdzane są narzędzia użytkowe. Narzędzia użytkowe powinny być sprawdzane przed oddaniem do użytku i następnie okresowo sprawdzane w izbach pomiarowych lub odpowiednich instytucjach. Zastosowanie właściwego rzędu wzorców i narzędzi kontrolnych oraz wprowadzenie lub pominięcie poprawek tych wzorców zależy od dokładności sprawdzanego narzędzia pomiarowego.

Dzięki temu, że narzędzia pomiarowe są wzorcowane i sprawdzane jednolitymi wzorcami, zapewniona jest jednolitość mierzenia i niezbędna dokładność wskazań narzędzi pomiarowych stosowanych w gospodarce narodowej.

L I T E R A T U R A

- [1] Förstner G.: Zur Wahl des Prüfwinkels bei dem Kreisteilungsprüfverfahren nach Heuvelink. Z. Instr. Nr 9/1964.
- [2] Morin W. A., Danilewicz F. M.: Izmerenije limbow awtokollimacjonnyj metodom. Izmeritel'naja Tiekhnika, Nr 3/1971.
- [3] Ostrowskij G. N., Dułow M. I., Draudin A. T.: Metod kalibrowki ugłomiernych szkał i priborow s odnowriemiennoj attestacijej obrazcowych mier. Izmeritel'naja Tiekhnika, Nr 4/1971.
- [4] Jasnorzewski J.: „Metrologia Długości”. Warszawa 1959 PPWK.

Przedstawiono na I Seminarium na temat metrologii geodezyjnej

Rękopis złożono w Redakcji w grudniu 1973 r.

ЕЖИ ГЛИВИНСКИ

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ И ПЕРЕДАЧА ЕДИНИЦЫ ПЛОСКОГО УГЛА
ПРИ ПОМОЩИ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ШТРИХОВЫХ
ОБРАЗЦОВ УГЛА

Резюме

Описываются исходные образцы плоского угла — многогранные призмы и не вмонтированные лимбы. Описаны образцовая установка, а также методы исследований образцов угла, применяемые в Польском комитете стандартизации и мер. Представлен путь передачи единицы плоского угла с основного образца через образцы низших рядов на измерительные инструменты.

JERZY GLIWINSKI

REPRODUCTION AND TRANSFER OF THE UNIT OF PLANE ANGLE
BY PLANE AND MARK STANDARDS OF ANGLE

Summary

The basic standards of plane angle a polyhedral prism and the unmounted limbs are discussed. The standard post and methods of investigation of the angle standards used at the PKNiM are described. A method of transferring the unit of plane angle from basic standards, through standards of lower orders, to the usable measuring tools is presented.