

Opracowanie metod badania limbusów przyrządów pomiarowych ze szczególnym uwzględnieniem wpływu mimośrodowości

1. Wstęp

Klasyfikacja limbusów pod względem ich dokładności nie została jeszcze ostatecznie ustalona. Natomiast w literaturze spotyka się podział limbusów na następujące cztery grupy:

1) limbasy wzorcowe (precyzyjne), w których odchylenie średnie kwadratowe błędów podziałki nie przekracza $\pm 0,5''$;

2) limbasy dokładne z odchyleniami średnimi kwadratowymi, zawartymi w granicach od $\pm 0,5''$ do $\pm 2''$;

3) limbasy średniოდokładne z odchyleniami średnimi kwadratowymi od $\pm 2''$ do $\pm 5''$;

4) limbasy zgrubne z odchyleniami średnimi kwadratowymi powyżej $\pm 5''$.

Niedokładność własna limbasa zależy głównie od błędów podziału jego obwodu za pomocą kresek. Istnieje wiele przyczyn, które wpływają na przebieg podziału limbasa i są źródłem jego błędów. Do najważniejszych z tych przyczyn należy zaliczyć:

1) własności chemiczne, fizyczne i mechaniczne materiału, z którego został wykonany limbus,

2) sposób wykonania jego podziałki.

Istnieją dwa zasadnicze sposoby wykonywania podziałki limbasa, a mianowicie:

1) sposób mechaniczny, polegający na nacinaniu kresek podziałki bezpośrednio na powierzchni kręgu limbasa,

2) sposób fotograficzny, polegający na reprodukowaniu podziałki z innego wzorca.

Źródła błędów, zależne przede wszystkim od sposobów wykonania limbusów, mogą być przypadkowe lub systematyczne, występujące regularnie. Aby zmniejszyć wpływ tych błędów na podział limbasa, należy wy-

eliminować ich przyczyny, które są interesujące zwłaszcza dla wykonawcy. Błędy podziałki są natomiast interesujące dla użytkowników, gdyż charakteryzują dokładność przyrządu. Znajomość tych błędów pozwala określić niedokładność pomiaru i ewentualnie wprowadzić poprawki do jego wyniku. W tym celu limbasy wzorcowe powinny być zaopatrzone w świadectwa z rozkładem błędów.

Określenie błędów nawet w przypadku ograniczonej liczby kresek limbasa jest związane z dużą pracą obserwacyjną i rachunkową. Na przykład przy zastosowaniu klasycznych metod do badania limbasa goniometru Wilda o średnicy 140 mm z działką elementarną $4'$, który na swoim obwodzie ma 5400 kresek, należałoby wykonać około $29 \cdot 10^6$ odczytań w celu określenia błędu dla każdej kreski. Dla tarcz impulsowych stosowanych obecnie w nowych rozwiązaniach przyrządów pomiarowych, zawierających niejednokrotnie $10\,000 \div 20\,000$ kresek, liczba odczytów byłaby niepomrotnie większa.

Z podanych przykładów wynika, że określenie błędów położenia wszystkich kresek wymagałoby olbrzymiego nakładu pracy. Dlatego należy zadowolić się sprawdzaniem stosunkowo niewielkiej, ale dostatecznej liczby kresek równomiernie rozłożonych na obwodzie i z otrzymanych błędów wysnuć wnioski o jakości całej podziałki oraz o stopniu pewności wyników pomiaru.

Celem pracy jest opanowanie i techniczna realizacja porównawczych metod badania limbusów, polegających na określaniu błędów podziału łącznie z błędami wynikającymi z mimośrodowości, z jaką badany limbus osadzony jest na stanowisku pomiarowym. Następnie przez eliminację wpływu mimośrodowości otrzymuje się błędy podziału limbasa.

Do badania limbusów zostały zastosowane różne wzorce kontrolne odpowiednie dla każdej z wymienionych już grup dokładności. Część tych wzorców, a mianowicie 8-kątna pryzma regularna, 8-kątna pryzma uniwersalna oraz interferometr z laserowym źródłem światła zostały opracowane i wykonane w ramach tej pracy.

Wzorce kontrolne oraz limbasy nie wmontowane zostały zbadane na stanowisku pomiarowym, którego budowa i montaż na podstawie opracowanej dokumentacji wchodzi również w zakres niniejszej pracy.

Przedstawione w pracy metody i środki pozwalają na powiązanie limbusów użytkowych poprzez wzorce kontrolne z podstawowym wzorcem kąta płaskiego. Zapewnia to jednolitość miar kąta w gospodarce narodowej.

W celu realizacji tego wzorca zostało zbudowane w ramach tej pracy odpowiednie stanowisko, które wraz z pryzmami wielościennymi stanowi obecnie w służbie miar podstawowy wzorec kąta płaskiego.

2. Uzasadnienie podjęcia tematu pracy

Zagadnienie dokładnego pomiaru limbusów wmontowanych było już od dawna przedmiotem całego szeregu prac naukowych. Wyniki tych prac nie zadowalają stale wzrastających wymagań, pomimo znacznych postępów odnośnie obniżenia nakładu prac pomiarowych i rachunkowych przy seryjnym wykonywaniu limbusów.

Stosowane dotychczas metody Heuvelinka, rozetowe, odkładania stałego kąta, Pérarda, Cook'a, Jelisiejewa, autokolimacyjna itp. polegają głównie na badaniu limbusów za pomocą stałego kąta, który jest mierzony w różnych położeniach limbusa. Metody te stosowane są przede wszystkim do badania limbusów wmontowanych w przyrządy pomiarowe, przy czym odczyty wykonuje się na urządzeniach przyrządu, w który wmontowany jest limbus. Większość dokładnych przyrządów do pomiaru kąta posiada dwa diametralnie położone urządzenia odczytowe, w związku z czym podczas badania limbusa zostają określone błędy średnicowe, które praktycznie wolne są od wpływu mimośrodowości. Niektóre z opisanych metod mogą być również stosowane do badania limbusów nie wmontowanych.

Przy badaniu limbusów nie wmontowanych bardziej istotne są od błędów średnicowych błędy kresek podziałki. Błędy te są ściśle związane z technologią wykonania limbusa i dlatego są również bardziej interesujące dla wykonawcy.

Na podstawie przeglądu i analizy dostępnej literatury można stwierdzić, że zagadnienie badania limbusów nie wmontowanych, w celu określenia błędów kresek, nie zostało dotychczas do końca rozwiązane. Chodzi tu zwłaszcza o takie metody badania limbusów nie wmontowanych, które mogłyby znaleźć zastosowanie zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak również przemysłowych. Najodpowiedniejszymi do tego celu, zdaniem autora, wydają się być metody porównawcze, polegające na porównaniu kątów sprawdzanego limbusa z kątami wzorca, którego błędy są znane. Chociaż analogiczne metody są szeroko już stosowane w technice pomiarów długości, w technice pomiarów kątów przy badaniu limbusów nie były w dostateczny sposób wykorzystane. Przyczyną tego w dużym stopniu są trudności wynikające z wpływu mimośrodowości limbusów wzorcowego i sprawdzanego przy ich porównywaniu oraz z mimośrodowości tych limbusów względem osi obrotu stołu stanowiska pomiarowego.

Stosowanie metod porównawczych wymaga zatem zbudowania odpowiedniego stanowiska pomiarowego umożliwiającego zamocowanie sprawdzanego limbusa współśrodkowo z osią obrotu stołu stanowiska.

3. Sformułowanie zagadnienia

Zdaniem autora dalszy postęp w dziedzinie sprawdzania podziałek kątowych limbusów można osiągnąć:

1) w zakresie zmniejszenia pracochłonności — przez zastosowanie wzorców kontrolnych,

2) w zakresie dokładności — przez zastosowanie nowocześniejszych zespołów pomiarowych (mikroskopy fotoelektryczne, układy interferencyjne).

Wobec stwierdzonego dużego wpływu niewspółosiowości na ogólny błąd wskazania do badania limbusów nie wmontowanych powinna być zastosowana metoda, która pozwoliłaby na określenie błędów wynikających z mimośrodowości limbusa i następnie umożliwiłaby wyeliminowanie tych błędów w taki sposób, żeby pozostały tylko błędy jego podziału. Do tego celu można wykorzystać metody różnicowe, które wymagają jednak starannego przygotowania i odpowiednio dokładnego sprawdzania wzorców kontrolnych.

Zadanie opracowania metod badania limbusów nie wmontowanych sprowadza się więc do rozwiązywania następujących zagadnień:

1) Zastosowanie metody graficznej lub obliczeniowej umożliwiającej oddzielenie błędów wynikających z samej mimośrodowości od błędów podziału.

2) Zaprojektowanie i wykonanie wzorców kontrolnych kąta.

3) Opracowanie i zbudowanie stanowiska pomiarowego umożliwiającego określenie oddzielnie wpływu mimośrodowości i wpływu błędów podziału kąta.

4) Zaprojektowanie i wykonanie specjalnych limbusów w celu przeprowadzenia analizy porównawczej dotychczas stosowanych metod i metod eliminacji mimośrodowości.

5) Zbadanie wzorców kontrolnych.

6) Zbadanie limbusów metodami wybranymi ze stosowanych dotychczas.

7) Zbadanie limbusów metodami eliminacji mimośrodowości.

4. Analiza i przedstawienie metod oddzielenia błędów wynikających z mimośrodowości od błędów podziału

Błędy okresowe kresek podziałki limbusa mogą być dla dowolnego kąta środkowego przedstawione przez szereg trygonometryczny

$$\Delta\varphi_k = \sum_{k=1}^n a_k \sin(k\varphi + A_k). \quad (1)$$

Wyrazy pierwszego rzędu $a_1 \sin(\varphi + A_1)$ przedstawiają mimośrodowość osi podziałki limbusa względem osi obrotu. Mimośrodowość ta działa więc jak okresowy błąd pierwszego rzędu.

Przy pomiarach z dwoma diametralnymi urządzeniami odczytowymi (tzw. pomiar kierunkowy) tworzy się średnią z dwóch odczytów i dlatego występują tu tylko błędy średnicowe, które można przedstawić w postaci szeregu

$$\Delta\varphi_{d_1} = \sum_{k=1}^n a_{2k} \sin(2k\varphi + A_{2k}). \quad (2)$$

W szeregu tym nie występują wyrazy o nieparzystych indeksach. Błędy średnicowe są więc wolne nie tylko od błędów spowodowanych mimośrodowością limbusa, lecz również wolne od wszystkich systematycznych błędów, które w szeregu Fouriera są reprezentowane przez nieparzyste wielokrotności kąta środkowego φ .

W celu zmniejszenia wpływu wyrazów wyższych rzędów w szeregu (2) należałoby zastosować większą liczbę równomiernie rozstawionych na podziałce limbusa mikroskopów. Wpływ błędów systematycznych jest coraz mniejszy. Wartości $\Delta\varphi_{d_i}$ zmniejszają się na ogół monotonicznie.

$$\Delta\varphi_k > \Delta\varphi_{d_1} > \dots > \Delta\varphi_{d_i}.$$

Do oceny błędów podziału można również wykorzystać szereg zawierający tylko nieparzyste wyrazy, a mianowicie

$$\Delta\varphi_{k_2} = \sum_{k=1}^n a_{2k-1} \sin[(2k-1)\varphi + A_{2k-1}]. \quad (3)$$

W szeregu tym pierwszy wyraz $a_1 \sin(\varphi + A_1)$ przedstawia mimośrodowość osi podziałki limbusa względem osi obrotu stołu stanowiska pomiarowego. Wartość tej mimośrodowości ma więc zasadnicze znaczenie przy określaniu błędów kresek limbusów nie wmontowanych.

Przy zastosowaniu jednostronnego odczytu wpływ mimośrodowości na wartość mierzonego kąta podaje następujący wzór

$$\Delta\varphi = \frac{e}{R} [\sin(\alpha_A + \varphi) - \sin \alpha_A], \quad (4)$$

gdzie

- e — mimośrodowość środka podziałki względem osi obrotu,
- R — promień limbusa,
- α_A — kąt pomiędzy kierunkiem mimośrodowości a ramieniem kąta odczytanego,
- φ — kąt odczytany.

Błąd $\Delta\varphi$ osiąga wartości ekstremalne dla $\alpha_A = 90^\circ$ lub 270° przy pomiarze kąta $\varphi = 180^\circ$, przy czym

$$\text{Extr. } \Delta\varphi = \pm \frac{2e}{R}. \quad (5)$$

Przy porównywaniu ze sobą dwóch limbusów na dokładność pomiaru wpływa zarówno mimośrodowość e_k limbusa kontrolnego, jak również mimośrodowość e_s limbusa sprawdzanego. W związku z tym błędy $\Delta\varphi_p$ wynikające z obu wymienionych mimośrodowości będą zawierały się w granicach

$$2\left(\frac{e_k}{R_k} - \frac{e_s}{R_s}\right) \leq \Delta\varphi_p \leq 2\left(\frac{e_k}{R_k} + \frac{e_s}{R_s}\right). \quad (6)$$

Jeśli mimośrodowości obu limbusów mają te same kierunki, to błędy wynikające z tych mimośrodowości wzajemnie się odejmują. Przy kierunkach przeciwnych błędy te będą się sumować. Ekstremalne wartości błędów wynoszą zatem

$$\text{Extr. } \Delta\varphi_p = \pm \frac{4e}{R}. \quad (7)$$

Przy zastosowaniu diametralnego odczytu błędy przeciwległych wskazań na podziałce katowej limbusa, wynikające z mimośrodowości jej środka z osią obrotu, znoszą się wzajemnie, jeśli prosta łącząca przeciwległe kreski przechodzi przez środek obrotu. W tym przypadku kąt obrotu φ' , określony jako wartość średnia z dwóch odczytań, dokonanych na przeciwległych kreskach podziałki limbusa, jest wolny od wpływu mimośrodowości. W przypadku, gdy proste łączące przeciwległe kreski podziałki katowej nie przechodzą przez środek obrotu, wtedy odcinek łączący rzeczywiste położenie kreski ze środkiem obrotu jest odchylony od linii łączącej osie mikroskopów o kąt γ . W wyniku tego powstaje błąd $\Delta\varphi_d$ określony równaniem

$$\Delta\varphi_d = \frac{e}{R} \gamma \sin \frac{\varphi'}{2} \sin \left(\frac{\varphi'}{2} - \alpha'_A \right). \quad (8)$$

Zastosowanie diametralnego odczytu nie eliminuje więc błędów spowodowanych mimośrodowością środka podziałki względem osi obrotu limbusa. Błędy te są jednak znacznie mniejsze niż przy odczycie jednostronnym.

Ukośne położenie limbusa względem płaszczyzny pomiarowej powoduje dodatkowy błąd pomiaru, którego wartość można określić z następującego wzoru, wyprowadzonego na podstawie trygonometrii sferycznej i szeregu Maclaurina

$$\Delta\varphi_b = (1 - \cos \psi) \sin \varphi \cos (2\alpha + \varphi), \quad (9)$$

gdzie ψ — kąt nachylenia powierzchni z podziałką do płaszczyzny prostopadłej do osi obrotu.

Z przedstawionych wyżej wzorów wynika, że błędy pomiaru spowodowane mimośrodowością osi podziałki sprawdzanego limbusa względem osi obrotu układają się według idealnej sinusoidy. W związku z czym błędy podziału limbusa uwidaczniają się przez odchylenie krzywej od tej sinusoidy. Badając limbus na odpowiednim stanowisku pomiarowym otrzymuje się przebieg błędów, które są sumą błędów podziału limbusa i błędów spowodowanych mimośrodowością. W celu obliczenia błędów wynikających z mimośrodowości należy obliczyć wartość e tej mimośrodowości z wzoru

$$e = \frac{R\Delta\varphi_{\max}}{2}, \quad (10)$$

gdzie $\Delta\varphi_{\max}$ — ekstremalna wartość błędów spowodowanych mimośrodowością.

Wartość $\Delta\varphi_{\max}$ może być określona bezpośrednio z wyników otrzymanych podczas badania limbusa.

Błędy poszczególnych kresek w przedstawionej metodzie wykreślnej określa się jako różnicę między rzędnymi wykresu przedstawiającego wyniki pomiaru i wykresu błędów spowodowanych mimośrodowością.

W metodzie analitycznej oddzielenia błędów spowodowanych mimośrodowością od błędów podziału badania przeprowadza się za pomocą dwóch diametralnie położonych mikroskopów. Różnica odczytów otrzymana z tych mikroskopów jest spowodowana:

- 1) błędami kresek x_i ,
- 2) mimośrodowością e osi podziałki limbusa względem jego osi obrotu,
- 3) nieprzechodzeniem linii łączącej osie mikroskopów przez środek obrotu powodującym powstawanie kąta γ , który jest dopełnieniem do 180° kąta obrotu.

Po uwzględnieniu wymienionych wyżej czynników można wyprowadzić końcowy wzór na błędy kresek, który ma postać

$$x_\varphi = T_\varphi - \left\{ \frac{1}{2} r_\varphi - \frac{1}{4n} \sum_1^{2n} r_\varphi - \frac{1}{2n} \left[\sum_1^{2n} r_\varphi \sin \varphi \right] \sin^e \varphi - \right. \\ \left. - \frac{1}{2n} \left[\sum_1^{2n} r_\varphi \cos \varphi \right] \cos \varphi \right\}. \quad (11)$$

Mimośrodowość e osi podziałki limbusa względem osi obrotu określa się, biorąc pod uwagę wszystkie punkty pomiaru, z następującego wzoru

$$e = \frac{R}{2n} \sqrt{\left(\sum_1^{2n} r_\varphi \sin \varphi\right)^2 + \left(\sum_1^{2n} r_\varphi \cos \varphi\right)^2} \quad (12)$$

gdzie r_φ — różnica odczytów dwóch diametralnie położonych mikroskopów.

5. Sposób przeprowadzania pomiarów

Przeprowadzona analiza i wynikające z niej metody wykreslna i analityczna umożliwiają badanie limbusów nie wmontowanych na stanowisku pomiarowym, dzięki możliwości oddzielenia błędów wynikających z mimośrodowości zamocowania limbusa od błędów jego podziału. Badanie to polega na porównywaniu kątów sprawdzanego limbusa z kątami wzorca kontrolnego, którego błędy są znane.

Możliwe są dwa sposoby przeprowadzania pomiarów. W pierwszym sposobie wzorzec kontrolny służy tylko do ustalania kąta obrotu i powinien być obracany zawsze o ten sam kąt. Różnice między wartościami kątów wzorca i limbusa określa się za pomocą mikroskopów mikrometrycznych nastawianych na kreski podziałki kątowej limbusa.

Drugi sposób polega na tym, że kąt obrotu ustalany jest za pomocą mikroskopów naprowadzanych kolejno na kreski podziałki kątowej sprawdzanego limbusa. Natomiast różnice w kątach określone są za pomocą urządzeń odczytowych wzorców kontrolnych.

Do badania limbusów nie wmontowanych zostały zastosowane następujące wzorce kontrolne, które nie wprowadzają dodatkowo błędów spowodowanych własną mimośrodowością:

1) Autokolimacyjny limbus kontrolny — przyrząd do sprawdzania podziałek kątowych produkcji Zeissa.

2) Wzorce powierzchniowe w postaci pryzm wielościennych:

- ośmiościenny wzorzec regularny,
- ośmiościenny wzorzec nieregularny,
- trzydziestosześcienne wzorzec regularny.

3) Interferometr z laserowym źródłem światła, w skład którego wchodzi:

- laser gazowy He-Ne model 119, firmy Spectra Physics, stabilizowany o długości fali $0,6328 \mu\text{m}$,
- układ optyczny składający się z dwóch zespołów zwierciadeł, stałego i ruchomego,
- dwie obudowy stałego i ruchomego zespołu zwierciadeł.

Interferometr oraz dwa wzorce ośmiościennie zostały po opracowaniu konstrukcyjnym wykonane w ramach tej pracy. Wzorzec trzydziestosześ-

ciościenny otrzymano z Instytutu Metrologii im. Mendelejewa w Lenin-gradzie w zamian za przekazanie limbusa wzorcowego wykonanego i zbadanego również w ramach tej pracy.

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej metod tradycyjnych i metod eliminacji mimośrodowości zostały zaprojektowane i wykonane dwa specjalne limbusey o średnicy 250 mm, szerokości kresiek podziałki katowej $0,006^{+0,001}$ mm i działce elementarnej 1° .

Zgodnie z zaleceniem RWPG Nr 1922-69 „Układ sprawdzań narzędzi do pomiaru kąta” limbusey te będą stosowane jako wzorce kąta, m.in. do badania stanowisk pomiarowych krajów członkowskich RWPG.

Do badania wzorców kontrolnych zostały zastosowane metody oparte na dwóch następujących założeniach:

- 1) Suma wszystkich kątów badanego wzorca jest równa 360° .
- 2) Suma odchyłeń od wartości nominalnych wszystkich kątów wzorca jest równa zero.

Limbus autokolimacyjny zbadany został metodą rozetową Brunsza z tym, że zastosowano inny sposób obliczenia błędów podziału, pozwalający na bezpośrednie obliczenie błędów średnicowych limbusa.

Do badania regularnego ośmiościennego wzorca pryzmatycznego zostało zmontowane urządzenie, w którym zamiast dwóch autokolimatorów stosuje się interferometr Michelsona. Odchylenia kątów od ich wartości nominalnej otrzymano na podstawie analizy serii obrazów interferencyjnych, uzyskanych z odpowiednich par powierzchni pomiarowych badanego wzorca, spełniających kolejno rolę zwierciadeł końcowych w interferometrze. Jako źródło światła zastosowano laser He-Ne.

Do badania nieregularnego ośmiościennego wzorca pryzmatycznego zastosowana została metoda autokolimacyjna, która pozwala na określenie błędów każdego kąta oddzielnie bez zastosowania wzorców odniesienia.

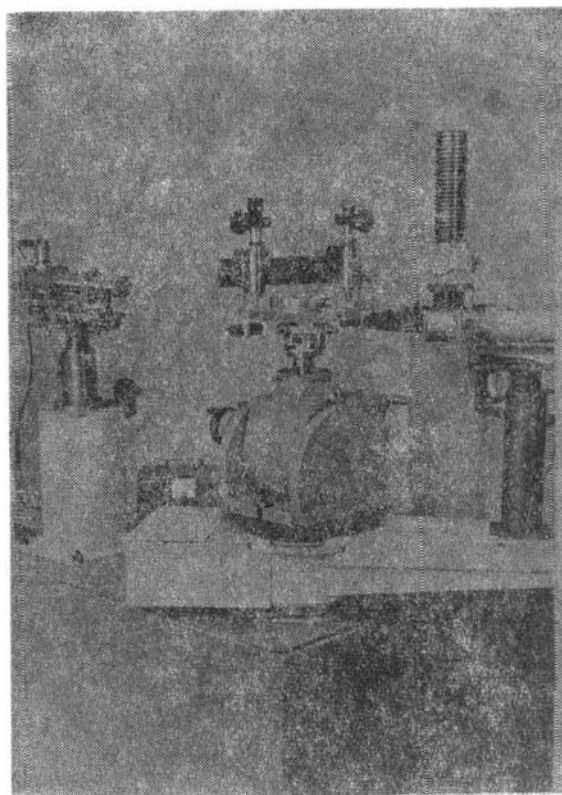
Trzydziestosześciościenny wzorec pryzmatyczny zbadano za pomocą dwóch autokolimatorów, z których jeden jest obracany dokoła osi badanego wzorca pryzmatycznego. Osie tych autokolimatorów ustawione prostopadle do sąsiednich powierzchni pomiarowych wzorca tworzą stały kąt, z którym następnie są porównywane pozostałe kąty badanego wzorca.

Interferometr z laserowym źródłem światła został zbadany za pomocą dwóch klinów optycznych o kątach $10''$ i $60''$, przywartych na kontakt optyczny do płaskiej powierzchni płytki szklanej. Wartości kątów klinów optycznych zostały wyznaczone na interferometrze Köstersa z liczby prążków występujących między kreskami o określonej między sobą odległości, znajdującymi się na powierzchni klina. Odległość między kreskami na klinie $10''$ wynosi 24,999 mm i na klinie $60''$ wynosi 17,007 mm. Jako źródło światła została zastosowana lampa helowa, dla której $\frac{\lambda}{2} = 0,29354731 \mu\text{m}$.

W wyniku tych pomiarów stwierdzono, że kąty klinów wynoszą 10,7" oraz 57,8". Odchylenia średnie kwadratowe dla tych kątów wynosiły odpowiednio $\pm 0,12''$ i $\pm 0,26''$.

6. Stanowisko pomiarowe

Na podstawie analizy metod eliminacji mimośrodowości, tradycyjnych metod stosowanych do badania limbusów i metod badania wzorców kontrolnych zbudowano specjalne stanowisko pomiarowe, na którym mogą



Rys. 1

być badane nie tylko limbasy nie wmontowane, ale również wszystkie wzorce kontrolne. Zbudowane stanowisko wraz z pryzmatycznymi wzorcami kąta stanowi obecnie w służbie miar podstawowy wzorzec kąta płaskiego.

Ogólny widok stanowiska przedstawia rysunek 1. Dla zabezpieczenia odpowiednich warunków pomiarowych stanowisko zbudowane jest na spe-

cialnie do tego celu wykonanym fundamencie odizolowanym od fundamentu budynku i znajduje się w pomieszczeniu o podwójnych ścianach zapewniających stabilizację temperatury w granicach $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

W skład stanowiska wchodzi trzy zespoły:

1) Zespół dwóch autokolimatorów. W początkowym okresie przeprowadzania badań stosowane były autokolimatory wizualne o działkach elementarnych $0,25''$. Pod koniec przeprowadzania części doświadczalnej zastosowano autokolimatory fotoelektryczne o działkach elementarnych $0,1''$ i $0,05''$. Autokolimatory zamocowane są na specjalnych podstawkach umożliwiających poziomowanie oraz pochylanie w zakresie około 3° . Podstawki zamontowane są na pionowych kolumnach o regulowanej wysokości. Jedna kolumna jest zamocowana na stałe bezpośrednio do fundamentu. Druga kolumna zamocowana jest na obrotowym ramieniu zmontowanym na dwóch łożyskach stożkowych.

2) Zespół mikrometrycznych mikroskopów wizualnych o powiększeniach 30 lub $300\times$ i działkach elementarnych odpowiednio $1\text{ }\mu\text{m}$ i $0,14\text{ }\mu\text{m}$. Mikroskopy mogą być ustawiane w różnych odległościach od siebie, co pozwala na sprawdzanie limbusów o średnicach od 60 do 300 mm.

3) Urządzenia obrotowe ze stołem przedmiotowym do mocowania badanych limbusów.

Badanie stanowiska pomiarowego obejmowało:

1) Określenie rzeczywistych wartości działek autokolimatorów za pomocą interferometru z laserowym źródłem światła.

2) Określenie działek elementarnych w mikroskopach za pomocą wzorców kreskowych.

3) Określenie wahaniasi osi obrotu stołu przedmiotowego za pomocą poziomnicy elektronicznej i regularnego ośmiościennego wzorca pryzmatycznego. W badanym stole wahania nie przekraczały $1''$.

Stanowisko zostało również zbadane za pomocą regularnego dwunastościennego wzorca pryzmatycznego wspólnie ze specjalistami radzieckimi z Instytutu Metrologii im. Mendelejewa w Leningradzie w ramach tematu RWPG Nr 1755—70 „Cykliczne porównania wzorców kąta”. Odchylenie średnie kwadratowe jednego pomiaru w serii pomiarów wymienionego wzorca wynosiło $\pm 0,15''$, a odchylenie średnie kwadratowe średniej arytmetycznej nie przekraczało $\pm 0,05''$. Wzorzec pryzmatyczny badany był również na stanowiskach pomiarowych ZSRR (przy udziale specjalistów polskich z PKNiM) i NRD. Odchylenia średnie kwadratowe jednego pomiaru wynosiły $\pm 0,15''$ w ZSRR i $\pm 0,12''$ w NRD.

Błędy pomiaru zostały określone metodą analityczno-doświadczalną, polegającą na ustaleniu czynników powodujących błędy, wyodrębnieniu błędów składowych i określeniu ich wartości doświadczalnie.

Za podstawowe dwie grupy składowe błędów pomiaru uważa się błędy wskazania i błędy odczytania.

Występujące przy badaniu limbusów błędy wskazania można podzielić na cztery grupy:

- 1) Błędy własne stanowiska zależne od:
 - niedokładności autokolimatorów,
 - niedokładności mikroskopów,
 - wahania osi obrotu stołu obrotowego.
- 2) Błędy wzorca kontrolnego spowodowane przez:
 - niedokładność wykonania kątów dwuściennych wzorców pryzmatycznych lub niedokładność podziału kontrolnego limbusa autokolimacyjnego,
 - nieodpowiednie wymiary powierzchni mierniczych wzorców pryzmatycznych,
 - niepłaskość i chropowatość powierzchni pomiarowych,
 - piramidalność oraz nieprostokątność powierzchni mierniczych do powierzchni podstawy wzorców pryzmatycznych.
- 3) Błędy spowodowane warunkami otoczenia, zależne głównie od:
 - zmian temperatury,
 - chwilowej zmiany gęstości powietrza,
 - wstrząsów.
- 4) Błędy własne badanych limbusów zależne przede wszystkim od:
 - jakości podziałki,
 - niepłaskości powierzchni,
 - czystości i niejednorodności szkła optycznego.

Głównymi czynnikami wpływającymi na błędy odczytania są:

- 1) Długość działki elementarnej i szerokość kresek podziałki autokolimatorów wizualnych i badanych limbusów oraz kontrastowość obrazu kresek bisektora autokolimatorów wizualnych.
- 2) Oświetlenia podziałki limbusa.
- 3) Błędy osobowe wynikające z niedokładności zmysłów obserwatora, w szczególności wzroku, oraz zmęczenie wywołane dość długim czasem przeprowadzania pomiarów.

Całkowity błąd pomiaru Δ_c został obliczony jako pierwiastek z sumy kwadratów następujących błędów składowych:

- $$\begin{aligned} \Delta_t &= 0,7'' \quad \text{— błąd spowodowany zmianami temperatury,} \\ \Delta_g &= 0,2'' \quad \text{— błąd spowodowany zmianą gęstości powietrza,} \\ \Delta_a &= 0,4'' \quad \text{— błąd naprowadzania dla autokolimatora wizualnego,} \\ \Delta_f &= 0,05'' \quad \text{— błąd naprowadzania dla autokolimatora fotoelektrycznego,} \\ \Delta_m &= 0,83'' \quad \text{— błąd naprowadzania dla mikroskopów.} \end{aligned}$$

Po uwzględnieniu wymienionych błędów składowych całkowity błąd pomiaru wynosi:

$\Delta_c' = \pm 1,50''$ przy zastosowaniu autokolimatora wizualnego,

$\Delta_c'' = \pm 1,37''$ przy zastosowaniu autokolimatora fotoelektrycznego.

7. Wyniki badań

Badania zostały przeprowadzone na dwóch limbusach oznaczonych znakami PKNiM nr 1 i PKNiM nr 2. Limbus nr 1 został zbadany metodami tradycyjnymi i metodami eliminacji mimośrodowości. Limbus nr 2 został zbadany metodami eliminacji mimośrodowości za pomocą różnych wzorców kontrolnych.

Do badania limbusa nie wmontowanego nr 1 wybrano trzy metody tradycyjne: Heuvelinka, rozetową i Cook'a oraz metodę analityczną eliminacji mimośrodowości. Ze względu na ograniczone możliwości druku autor przedstawił wyniki badań błędów średnicowych tylko graficznie na rysunku 2.

Limbus nr 2 badany był metodą analityczną eliminacji mimośrodowości przy zastosowaniu wymienionych już wzorców kontrolnych. Wyniki badań błędów podziału kreskowego tego limbusa przedstawione są również tylko graficznie na rysunku 3.

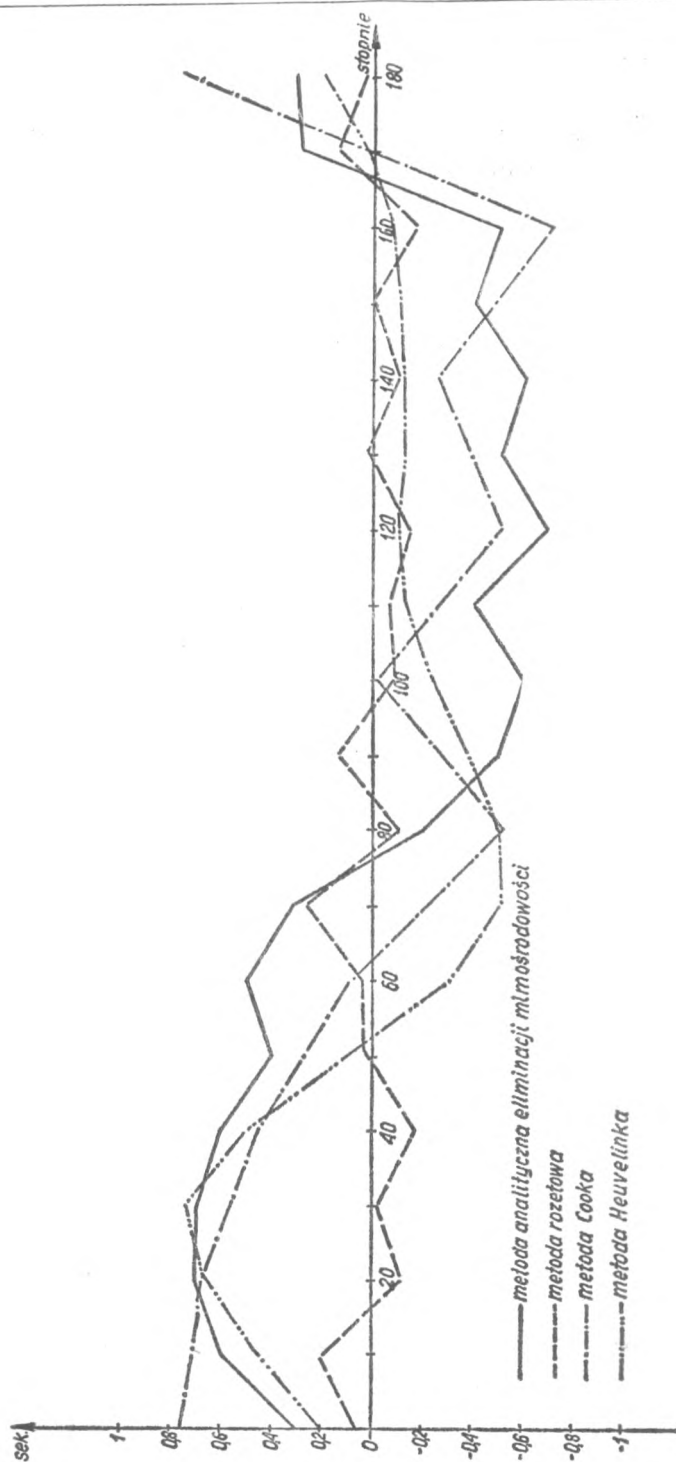
Wyniki badań wzorców kontrolnych, ze względów już wymienionych, nie mogą być przedstawione w niniejszej publikacji.

8. Analiza wyników badań

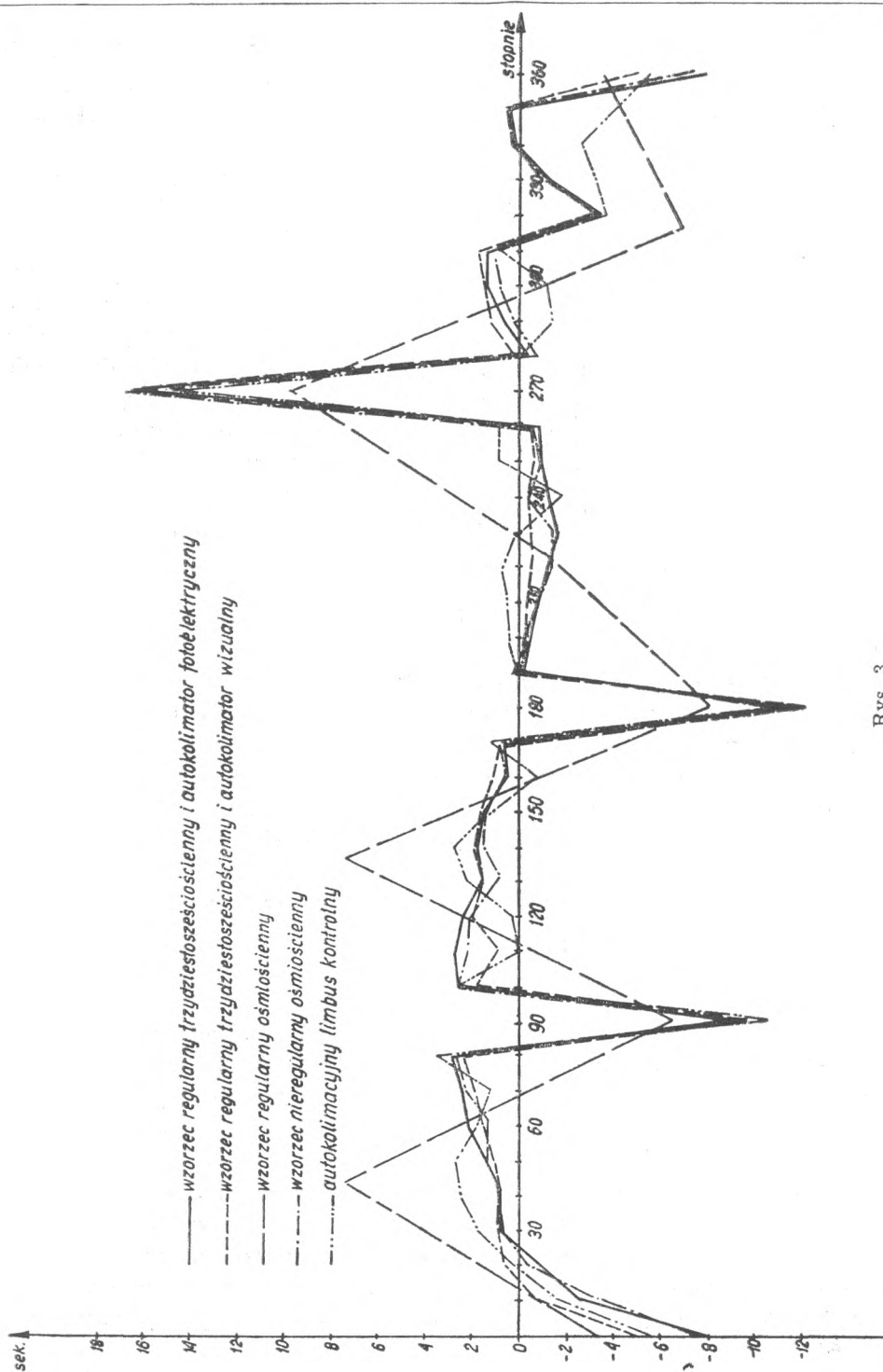
Metoda Heuvelinka nie daje konkretnych wartości błędów kątów lub kresek, pozwala jedynie na przybliżone określenie przebiegu systematycznych błędów średnicowych oraz średniego błędu podziału. Na niedokładność tej metody mają wpływ: średni błąd podziału, niedokładność określenia błędów systematycznych oraz odchylenie od wartości optymalnej kątów sprawdzenia dla poszczególnych wyrazów szeregu Fouriera. Całkowity błąd pomiaru kąta, po uwzględnieniu trzech wyrazów tego szeregu, wynosi $\pm 0,48''$.

Chociaż wartość ta jest mało porównywalna z niedokładnością pozostałych metod, przyjęto ją jako wartość charakteryzującą metodę Heuvelinka.

Metoda rozetowa nie uwzględnia wpływu mimośrodowości środka podziałki względem osi obrotu na wartość mierzonego kąta. Dlatego też metodą rozetową zostały określone błędy średnicowe. Niedokładność tej me-



Rys. 2



Rys. 3

tody określona odchyleniem średnim kwadratowym błędów podziałki limbusa nr 1 wynosi $\pm 0,86''$.

Metodą Cook'a określono również tylko błędy średnicowe. Odchylenie średnie kwadratowe dla tej metody wynosi $\pm 0,39''$.

Metoda wykresna oddzielenia błędów spowodowanych mimośrodowością od błędów podziału pozwala na określenie błędów kresek. Oprócz niedokładności pomiaru na niedokładność tej metody mają wpływ czynniki takie, jak: niedokładność określenia wartości mimośrodowości i jej kierunku, odchylenie osi obrotu od płaszczyzny przechodzącej przez osie mikroskopów oraz niedokładność określenia różnic rzędnych krzywych błędów otrzymanych przy badaniu limbusa i błędów spowodowanych mimośrodowością. Stosowanie tej metody jest uwarunkowane możliwością przybliżenia wykresu błędów do sinusoidy, co jest możliwe tylko w tym przypadku, gdy wartość mimośrodowości jest duża w stosunku do błędów podziału oraz gdy okres przebiegu tego wykresu wynosi 2π .

Niedokładność metody wykresnej eliminacji błędów spowodowanych mimośrodowością jest określona wzorem

$$s = \sqrt{\delta_e^2 + u^2 + p^2} \quad (13)$$

gdzie

δ_e — błąd przypadkowy spowodowany niedokładnością wyznaczania wartości i kierunku mimośrodowości oraz określenia różnic rzędnych wykresu błędów,

u — błąd systematyczny spowodowany nieprzechodzeniem linii łączącej osie mikroskopów przez środek obrotu stołu stanowiska,

p — błąd przypadkowy wynikający z niedokładności przybliżenia wykresu błędów do sinusoidy.

Obliczona na podstawie tego wzoru niedokładność wynosi:

$\pm 1,18''$ dla limbusa nr 1,

$\pm 1,67''$ dla limbusa nr 2.

Metoda analityczna oddzielenia błędów spowodowanych mimośrodowością od błędów podziału pozwala na określenie błędów kątów, błędów kresek i błędów średnicowych. Cechą wyróżniającą tę metodę jest możliwość wyeliminowania wszystkich błędów systematycznych spowodowanych mimośrodowością środka badanego podziału limbusa względem osi obrotu stołu oraz nieprzechodzeniem linii łączącej osie mikroskopów przez oś obrotu stołu stanowiska. Wartość mimośrodowości jest wyznaczona na podstawie wszystkich punktów pomiarowych, przez co uzyskuje się dużo mniejszą niedokładność jej określenia, ponieważ jest wyeliminowany wpływ przypadkowych błędów pomiaru w poszczególnych punktach podziału.

Błąd systematyczny spowodowany nieprzechodzeniem linii łączącej osie mikroskopów przez oś obrotu stołu jest wyznaczony na podstawie wyników pomiarów we wszystkich badanych punktach i uwzględniany przy określaniu błędu każdej badanej kreski lub każdego badanego kąta limbusa. Występują tu więc tylko przypadkowe błędy pomiaru, składające się z błędów wskazania i błędów odczytania.

Niedokładność metody analitycznej jest określona jako odchylenie średnie kwadratowe z serii niezależnie wykonanych pomiarów tego samego limbusa przy nie zmienionym wzorcu kontrolnym.

Niedokładność ta wynosi:

1) Dla limbusa nr 1

— przy zastosowaniu regularnego trzydziestosześcioramiennego wzorca pryzmatycznego:

$\pm 0,16''$ przy określaniu błędów średnicowych,

$\pm 0,26''$ przy określaniu błędów kresek,

$\pm 0,37''$ przy określaniu błędów kątów.

2) Dla limbusa nr 2

— przy zastosowaniu regularnego trzydziestosześcioramiennego wzorca pryzmatycznego:

$\pm 0,16''$ przy określaniu błędów średnicowych,

$\pm 0,40''$ przy określaniu błędów kresek,

$\pm 0,68''$ przy określaniu błędów kątów;

— przy zastosowaniu regularnego ośmiościennego wzorca pryzmatycznego:

$\pm 0,11''$ przy określaniu błędów średnicowych,

$\pm 0,29''$ przy określaniu błędów kresek,

$\pm 0,53''$ przy określaniu błędów kątów;

— przy zastosowaniu nieregularnego ośmiościennego wzorca pryzmatycznego:

$\pm 0,27''$ przy określaniu błędów średnicowych,

$\pm 0,56''$ przy określaniu błędów kresek,

$\pm 0,75''$ przy określaniu błędów kątów;

— przy zastosowaniu autokolimacyjnego limbusa kontrolnego:

$\pm 0,73''$ przy określaniu błędów średnicowych,

$\pm 0,89''$ przy określaniu błędów kresek,

$\pm 1,25''$ przy określaniu błędów kątów.

Niedokładność wyznaczenia kątów wzorców kontrolnych jest określona jako odchylenie średnie kwadratowe na podstawie serii wyników pomiarów i wynosi:

$\pm 0,37''$ dla autokolimacyjnego limbusa kontrolnego,

$\pm 0,20''$ dla regularnego ośmiościennego wzorca pryzmatycznego,

$\pm 0,20''$ dla nieregularnego ośmiościennego wzorca pryzmatycznego,

$\pm 0,06''$ dla regularnego trzydziestosześcioramiennego wzorca pryzmatycznego.

Wyniki badań błędów średnicowych określone metodami Heuvelinka, rozetową, Cook'a i analityczną eliminacji mimośrodowości przedstawione są graficznie na rysunku 2. Otrzymane krzywe błędów dla wymienionych metod wykazują dużą zgodność. Metody te można więc uważać za równorzędne.

W celu określenia dokładności limbusa nr 1 obliczony został średni błąd podziału jako odchylenie średnie kwadratowe dla wszystkich badanych punktów podziałki kątowej. Określone w ten sposób niedokładności limbusa przy zastosowaniu różnych metod są podane poniżej wraz z niedokładnościami określenia błędów średnicowych.

Metoda	Błędy	Niedokładności
Heuvelinka	$\pm 0,42''$	$\pm 0,48''$
Rozetowa	$\pm 0,12''$	$\pm 0,86''$
Cook'a	$\pm 0,51''$	$\pm 0,39''$
Analityczna	$\pm 0,28''$	$\pm 0,16''$

Suma błędów średnich podziału średnicowego i niedokładności pomiaru określa granice, w jakich zawierają się błędy podziału limbusa z poziomem ufności 67%. Dla metod Heuvelinka, rozetowej i Cook'a sumy te są prawie jednakowe, co świadczy o ich równoważności. W analitycznej metodzie eliminacji mimośrodowości suma ta jest dwukrotnie mniejsza.

Limbus nr 2 badany był metodą analityczną eliminacji mimośrodowości przy zastosowaniu wszystkich opisanych wzorców kontrolnych oraz metodą wykreślną przy zastosowaniu tylko regularnego trzydziestosześcioramiennego wzorca pryzmatycznego. Określone zostały wszystkie trzy rodzaje błędów charakteryzujące podziałkę kątową limbusa, a mianowicie błędy podziału średnicowego, kreskowego i kątoowego.

Przykładowo podane tu błędy podziału kreskowego przedstawione są graficznie na rysunku 3. Przebieg krzywych błędów wykazuje daleko idącą zgodność dla poszczególnych wzorców kontrolnych.

Błędy średnie podziału kreskowego limbusa nr 2 wraz z niedokładnościami określenia tych błędów przedstawiają się następująco:

Wzorzec kontrolny	Błędy	Niedokładność
Regularny trzydziestosześcioramienny	$\pm 4,20''$	$\pm 0,40''$
Regularny ośmiościenny	$\pm 5,60''$	$\pm 0,29''$
Nieregularny ośmiościenny	$\pm 4,12''$	$\pm 0,59''$
Autokolimacyjny limbus kontrolny	$\pm 4,13''$	$\pm 0,89''$

Udział błędów spowodowanych zmianami temperatury jest niejednakowy dla różnych metod. Na skutek miejscowego ogrzewania się części sta-

nowiska zależy to głównie od czasu przeprowadzania prac obserwacyjnych, który jest uwarunkowany ilością punktów sprawdzania i ilością przeprowadzonych serii. Największy wpływ temperatury występuje dla metody Cook'a, a następnie kolejno zmniejsza się dla metody rozetowej, Heuvelinka i eliminacji mimośrodowości. Z tego też względu zmniejszenie ilości punktów sprawdzania daje lepszą dokładność przez zmniejszenie błędów spowodowanych zmianami temperatury w czasie pomiaru kosztem kompletności wyników badań. Przypadek ten zachodzi przy zastosowaniu regularnego ośmiościennego wzorca pryzmatycznego.

9. Ocena stosowanych metod pomiarowych

Badania zostały przeprowadzone w dwóch kierunkach:

1) Badania limbusa nr 1 różnymi metodami przy zastosowaniu tego samego wzorca.

2) Badania limbusa nr 2 metodami porównawczymi eliminacji mimośrodowości przy zastosowaniu różnych wzorców kontrolnych.

Metoda wykreślna eliminacji mimośrodowości daje możliwość określenia tylko błędów kresek, wobec czego nie jest porównywalna z metodami takimi, jak Heuvelinka, rozetową lub Cook'a. Można ją porównać tylko z metodą analityczną eliminacji mimośrodowości.

Metoda wykreślna określenia błędów kresek jest mniej dokładna od metody analitycznej, ponieważ błędy te określa się na podstawie wykresu przyjmując do obliczeń różnice rzędnych ekstremalnych punktów, co wprowadza dodatkowe błędy spowodowane z jednej strony mało dokładnym odczytywaniem błędów, a z drugiej strony błędami przypadkowymi punktów ekstremalnych. Metoda ta może być stosowana w tych przypadkach, kiedy bardziej pożądane jest szybkie otrzymanie informacji o jakości podziału badanego limbusa niż ekstremalnie dokładne wyznaczenie błędów. Metoda analityczna eliminacji mimośrodowości jest metodą uniwersalną, pozwalającą na określenie błędów średnicowych, błędów kątów oraz błędów kresek i dlatego może być porównywana z wszystkimi dotychczas stosowanymi metodami.

Z przeprowadzonych porównań metod określania błędów średnicowych wynika, że metoda analityczna jest dokładniejsza od metod Heuvelinka, rozetowej i Cook'a przy dwunastokrotnym zmniejszeniu ilości pomiarów w stosunku do metody Cook'a i sześciokrotnym zmniejszeniu ilości pomiarów w stosunku do metody rozetowej. Metoda Heuvelinka w odróżnieniu od pozostałych metod określa tylko rozkład średnich błędów średnicowych, nie podaje natomiast konkretnych wartości tych błędów.

Niedokładność określenia błędów podziału limbusa zależy w dość istotny sposób od niedokładności zastosowanego wzorca kontrolnego. Błędy podziału otrzymane przy zastosowaniu autokolimacyjnego limbusa kontrolnego najbardziej odbiegają od pozostałych wyników, co jest spowodowane tym, że autokolimacyjny limbus kontrolny jest najmniej dokładnym spośród zastosowanych wzorców kontrolnych.

Wzorce pryzmatyczne: regularny trzydziestosześciościenny i nieregularny ośmiościenny przedstawiają sobą wzorce kontrolne w przybliżeniu tej samej dokładności i wartości błędów otrzymane przy ich zastosowaniu różnią się minimalnie. Zastosowanie jednak wzorca trzydziestosześcioramiennego jest bardziej ekonomiczne, ponieważ obserwacje wykonuje się przy jednym ustawieniu wzorca. Przy zastosowaniu nieregularnego ośmiościennego wzorca obserwacje tej samej ilości punktów uzyskuje się w 9 seriach przy różnych ustawieniach tego wzorca względem limbusa.

Celowe jest więc stosowanie regularnego trzydziestosześcioramiennego wzorca przy seryjnych pomiarach i ustalonym programie sprawdzania. Nieregularny ośmiościenny wzorec pryzmatyczny wygodniej jest stosować w badaniach laboratoryjnych przy różnych wartościach sprawdzanych przedziałów kątowych, co w przypadku stosowania tylko wzorców regularnych wymagałoby dysponowania zestawem wielu tych wzorców o różnych wartościach kątów.

Wartości błędów podziału limbusów otrzymane przy zastosowaniu regularnego ośmiościennego wzorca pryzmatycznego różnią się nieco od wartości otrzymanych przy zastosowaniu innych wzorców głównie z tego powodu, że pomiarem objęta jest niewielka liczba punktów podziałki, wobec czego wychwycone są tylko błędy niektórych punktów sprawdzanych. Ponadto nie wszystkie punkty sprawdzane przy użyciu regularnego ośmiościennego wzorca pokrywają się z punktami sprawdzanymi przy zastosowaniu pozostałych wzorców kontrolnych. Z tego względu określona na podstawie tych wyników wartość niedokładności pomiaru jest nieco zaniżona w stosunku do niedokładności pomiaru otrzymanej przy użyciu pozostałych wzorców kontrolnych. Wzorec ten może być stosowany w przypadkach konieczności szybkiego wyznaczenia błędu średniego podziału bez dokładnego określenia konkretnych wartości błędów w pośrednich punktach.

Zastosowanie autokolimatora fotoelektrycznego do określania rzeczywistego kąta obrotu zmniejsza około dziesięciokrotnie niedokładność odczytania kąta obrotu wzorca, co powoduje zmniejszenie niedokładności pomiaru o około 40%.

Według podanego na wstępie podziału limbusów do badania limbusów wzorcowych o odchyleniu średnim kwadratowym błędów podziałki, nie przekraczającym $\pm 0,5''$, może być stosowana metoda analityczna eliminacji

mimośrodowości za pomocą autokolimatora fotoelektrycznego przy zastosowaniu regularnego trzydziestosześciennego wzorca pryzmatycznego.

Do badania limbusów dokładnych z odchyleniami średnimi kwadratowymi zawartymi w granicach $\pm(0,5 \div 2,0)''$ może być stosowana metoda analityczna eliminacji mimośrodowości przy zastosowaniu również autokolimatorów wizualnych oraz pryzmatycznych wzorców kontrolnych.

Do badania limbusów średniokładnych z odchyleniami średnimi kwadratowymi zawartymi w granicach $\pm(2,0 \div 5,0)''$ może być stosowana zarówno analityczna, jak i wykreślna metoda eliminacji mimośrodowości przy użyciu wszystkich objętych badaniem w ramach tej pracy wzorców kontrolnych. Podane tu wartości niedokładności zostały otrzymane przy zastosowaniu do naprowadzania na kreski podziałki kątowej limbusa mikroskopów wizualnych o niedokładności $\pm 0,83''$. Zastosowanie mikroskopów fotoelektrycznych o niedokładności $\pm 0,02''$ naprowadzania na kreskę, w zasadniczy sposób polepszy niedokładność pomiaru limbusów nie wmontowanych.

Uzyskiwana dotychczas dokładność pomiaru wzorców kąta płaskiego nie przekraczała $\pm 0,5''$ w zakresie 180° , przy czym pomiary przeprowadzane były tylko metodami porównawczymi z limbusem goniometru. Zbudowane w wyniku tej pracy stanowisko pomiarowe umożliwia obecnie przekazywanie gospodarce narodowej jednostki kąta płaskiego około dwu i półkrotnie dokładniej i w pełnym zakresie 360° . Ponadto do badania wzorców kąta mogą być stosowane metody bezwzględne, nie wymagające żadnych wzorców odniesienia.

Efekty ekonomiczne metod stosowanych do badania limbusów najwyraźniej uwidaczniają się przez zmniejszenie pracochłonności przeprowadzanych badań i wykonania obliczeń. Ma to szczególnie duże znaczenie przy produkcji seryjnej, gdzie czas wykonania limbusa jest stosunkowo mały względem czasu jego sprawdzania.

Przy badaniu limbusa co 10° i zaangażowaniu dwóch pracowników do prac obserwacyjnych i jednego pracownika do prac obliczeniowych szacunkowa pracochłonność określania konkretnych wartości błędów podziału wynosi odpowiednio:

180 roboczogodzin dla metody Cook'a,

120 roboczogodzin dla metody rozetowej,

12 roboczogodzin dla metody analitycznej eliminacji mimośrodowości,

6 roboczogodzin dla metody wykreślnej eliminacji mimośrodowości.

Pracochłonność określenia ogólnego przebiegu krzywej błędów i wyznaczania błędu średniego metodą Heuvelinka przy zastosowaniu wyżej podanych warunków wynosi około 40 roboczogodzin.

10. Wnioski końcowe

Rozwiązanie w pracy postawionego zadania dało następujące wyniki:

1. Na podstawie przeprowadzonej analizy stosowanych dotychczas metod badania limbusów, przede wszystkim wmontowanych w przyrządy pomiarowe, stwierdzono, że metody te mogą być stosowane do określania błędów średnicowych limbusów nie wmontowanych.

2. Do badania błędów kresek limbusów nie wmontowanych zastosowano dwie metody: metodę wykreślną i metodę analityczną, umożliwiające oddzielenie błędów wynikających z samej mimośrodowości od błędów podziału. Metoda analityczna pozwala na znalezienie wszystkich rodzajów błędów charakteryzujących podziałkę limbusa, a mianowicie błędów średnicowych, błędów kresek i błędów kątów.

3. Niedokładność metody analitycznej odpowiada wymaganiom stawianym przy badaniu najdokładniejszych limbusów i może być jeszcze zwiększona przez zastosowanie autokolimatorów i mikroskopów fotoelektrycznych.

4. Zaprojektowano i wykonano następujące wzorce kontrolne: dwa ośmiościenne wzorce pryzmatyczne, dwa kreskowe wzorce kąta oraz interferometr z laserowym źródłem światła.

5. Zaprojektowano i zbudowano specjalne stanowisko pomiarowe pozwalające na stosowanie oprócz metod eliminacji mimośrodowości również metod tradycyjnych i przeprowadzania badań wzorców kontrolnych.

Stanowisko to wraz z pryzmatycznymi wzorcami kąta stanowi obecnie w służbie miar podstawowy wzorzec kąta płaskiego. Stworzenie w Polskim Komitecie Normalizacji i Miar podstawowego wzorca kąta płaskiego umożliwiło nawiązanie kontaktów i przeprowadzanie wspólnych prac badawczych w ramach RWPG i dwustronnej współpracy ze Związkiem Radzieckim i NRD w zakresie wyjściowych wzorców kąta płaskiego.

W roku 1972 zostały przeprowadzone wzajemne porównania regularnego dwunastościennego wzorca pryzmatycznego w ramach tematu RWPG. Osiągnięte w poszczególnych krajach dokładności są następujące:

ZSRR	$\pm 0,15''$
NRD	$\pm 0,12''$
CSRS	$\pm (0,15 \div 0,21)''$
PRL	$\pm 0,15''$

Z przeprowadzonych badań wynika, że uzyskiwana na stanowisku PKNiM dokładność badania pryzmatycznych wzorców kąta jest na poziomie dokładności uzyskiwanej w krajach takich, jak ZSRR i NRD.

6. W celu uzyskania wyższej dokładności i wydajności pomiarów przewiduje się zainstalowanie mikroskopów fotoelektrycznych i automatyzację procesu pomiarowego. Po wykonaniu urządzenia liczącego przewiduje się wykorzystanie interferometru jako wzorca kontrolnego do sprawdzania wzorców kąta metodą automatycznego liczenia prążków interferencyjnych. Umożliwi to sprawdzanie wzorców kąta w przedziałach kątowych od $0,1''$ zamiast od 10° , jak to ma miejsce przy zastosowaniu wzorców pryzmatycznych.

L I T E R A T U R A

- [1] Cook A. H.: The calibration of circular scales and precision polygons. *British Journal of Applied Physics* nr 10/1954.
- [2] Delisle C.: Etalonnage de polygones optiques par interférométrie en lumière laser. *Canadian Journal of Physics* nr 1/1970.
- [3] Ejdinow W. I.: Izmierenije ugłow w maszynostrojenii. STANDARTDIZ, 1963.
- [4] Förstner G.: Zur Wahl des Prüfwinkels bei dem Kreisteilungsprüfverfahren nach Heuvelink. *Zeitschrift für Instrumentenkunde* nr 9/1964.
- [5] Gliwiński J.: Metoda umożliwiająca wyeliminowanie wpływu mimośrodowości na dokładność pomiaru podziałki kątowej limbusa. *Praca naukowo-badawcza*, temat nr 175/1970, PKNiM.
- [6] Gliwiński J., Sacewicz J.: Metody odtwarzania kątów za pomocą wzorców powierzchniowych. Zeszyt 5, V Krajowej Konferencji Metrologii, Poznań 1972.
- [7] Hanneman I., Würzner W.: Verfahren zur Darstellung von ebenen Winkeln mit hoher Genauigkeit. *Feingerätetechnik* nr 5/1970.
- [8] Jasnorzewski J.: Pomiary kątów dwuściennych różnicową metodą autokolimacyjną. Opisano w książce Jerzego Szymońskiego „Instrumentoznawstwo geodezyjne”. Część I. Warszawa 1954.
- [9] Kajak L. K., Martynow W. T.: Prowierka tieodolitow i drugih ugłomiernych priborow po obrazcowym mnogogrannym prizmam. *Izmeritielnaja Tiekhnika* nr 3/1968.
- [10] Krug W.: Präzisionskreisteilungen. *Feingerätetechnik* nr 5/1952.
- [11] Krug W.: Zur Frage wirtschaftlicher Kreisuntersuchungsverfahren. *Feingerätetechnik* nr 1/1957.
- [12] Martynow W. T.: Opriedielenija pogriesznostiej dielenij limbow tieodolitow sposobom kalibrowki pri pomoszczi mnogogrannych prizm. *Izmeritielnaja Tiekhnika* nr 1/1971.
- [13] Morin W. A., Danilewicz F. M.: Izmierenije limbow awtokolimacjonnyj metodom. *Izmeritielnaja Tiekhnika* nr 3/1971.
- [14] Noch R., Steiner O.: Die Bestimmung von Kreisteilungsfehlern nach einem Rosettenverfahren. *Zeitschrift für Instrumentenkunde* nr 2/1961.
- [15] Noch R.: Messverfahren für die Teilungsfehler eines Theodolit-Horizontalkreises in seiner Gebrauchslage. *Zeitschrift für Instrumentenkunde* nr 2/1961.
- [16] Noch R.: Untersuchung eines Winkelmessgerätes. *Werkstattstechnik* nr 52/1962.
- [17] Peglov M.: Winkelmessungen an unregelmässigen Spiegelpolygonen. *Feinwerktechnik* nr 3/1968.

- [18] Sakayanagi Y.: Über das Gitterprisma zur absoluten Winkelmessung. Micro-technik nr 8/1968.
- [19] Szczeniowski Sz.: Fizyka doświadczalna, cz. IV. Optyka. PWN, Warszawa 1955.
- [20] Tomaszewski A.: Zarys metrologii warsztatowej. PWT, Warszawa 1955.
- [21] Weiss W.: Zur hochgenauen elektrischen Winkelmessung mit Hilfe nichtfehlerfreier Teilungen. Feingerätetechnik nr 10/1971.
- [22] Zalecenie RWPG RS 1922-69: Układ sprawdzian wzorców i narzędzi do pomiaru kąta.

Recenzował: doc. inż. Jerzy Jasnorzewski

Rękopis złożono w Redakcji w listopadzie 1975 r.

ЕЖИ ГЛИВИНСКИ

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ЛИМБОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ С ОСОБЫМ УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА

Р е з ю м е

Работа содержит совокупность вопросов исследования лимбов прежде всего невмонтированных. В теоретическо-аналитической части представлено принцип каждого метода и подробный ход вычислений. Проектная часть охватывает проект поста для исследования лимба, специального интерферометра с лазерным источником света и специальных призматических образцов угла. В исследовательской части описано и представлено результаты наблюдений измерительного поста и контрольных образцов, а также описание и результаты наблюдений невмонтированных лимбов. В заключительной части сопоставляются результаты примененных методов исследования лимбов вместе с оценкой их практической пригодности и примером применения для промышленных нужд (потребностей).

JERZY GLIWIAŃSKI

ELABORATION OF THE METHODS OF EXAMINATION OF THE
MEASUREMENT DEVICES'S LIMBS WITH PARTICULAR
CONSIDERATION OF THE INFLUENCE OF ECCENTRICITY

Summary

The paper deals with the total problem of the limbs' examination and in the first place of non-mounted limbs. The principle of each method and a detailed course of calculation is described in the theoretical-analytic part. The designing part includes the design of a stand for limb examination, of a special interferometer with the laser source of light and of special prismatic patterns of an angle. In the experimental part the results of the experiments of a measurement stand and control patterns as well as the description and the results of the analyses of non-mounted limbs have been introduced and discussed. The conclusion part introduces the confrontation of the results obtained due to the used methods of examination of the limbs together with evaluation of their practical utility and an example of their use for the industrial needs.