

ZBIGNIEW ZĄBEK
BOGUSŁAWA KALINOWSKA

531.713

Poziomo-pionowy komparator i wyznaczanie średniego metrałaty w pozycji pionowej

W najbliższych latach przewiduje się przeprowadzenie w Polsce i w krajach sąsiednich nowego pomiaru podstawowej sieci niwelacji precyzyjnej. Mając na uwadze przede wszystkim to olbrzymie zadanie Instytut Geodezji Wyższej i Astronomii Geodezyjnej Politechniki Warszawskiej podjął w ramach współpracy z Instytutem Geodezji i Kartografii prace naukowo-badawcze dla zapewnienia jednostki metra w niwelacji precyzyjnej. W przeprowadzonych badaniach prócz autorów niniejszego artykułu brał udział doc. dr Józef Cieślak.

W toku przeprowadzonych prac nad wyżej wymienionym tematem zbudowany został w laboratorium Instytutu Geodezji Wyższej i Astronomii Geodezyjnej Politechniki Warszawskiej poziomo-pionowy komparator do badania i komparacji precyzyjnych lat niwelacyjnych. W pracach konstrukcyjnych konsultantem był dr inż. Zbigniew Stańczyk, a głównym wykonawcą komparatora st. majster Jerzy Maciurzyński.

Zbudowany komparator umożliwia wyznaczenie długości średniego metrałaty w pozycji pionowej oraz daje możliwość opracowania i swobodnego doboru metod badania błędów podziałułaty.

Komparator składa się z 2 części: poziomej i pionowej. Komparator poziomy wyposażony jest w 5 mikroskopów, z których 4 osadzone są w sposób trwały w odstępach 1 m na ścianie wewnętrznej budynku o grubości 1 m, zaś 1 mikroskop osadzony jest na prowadnicy umożliwiającej przesuwanie mikroskopu na odcinku 1 metra (rys. 1).

Zamocowanie każdego mikroskopu umożliwia skrócenie osi mikroskopu w 2 prostopadłych płaszczyznach w granicach kilku stopni i przesunięcie w 2 prostopadłych kierunkach w granicach kilku centymetrów. W ten sposób możliwe jest ustawienie precyzyjne osi mikroskopów w pozycji pionowej w płaszczyźnie równoległej do toru komparatora.

Tor poziomy komparatora wykonany jest z odpowiednio ofrezowanej belki stalowej wspartej na 5 słupach w sposób umożliwiający regulację osi toru. Słupy posadowione są na betonowej podłodze, której grubość sięga blisko 1 m. W zamocowaniu mikroskopów i toru komparatora świadomie nie zastosowano niezależnych słupów, gdyż doświadczenia przeprowadzone na istniejących w laboratorium słupach niezależnych i zależnych wykazują, że drgania pochodzące od ruchu ulicznego przenoszą się bardziej na słupy niezależne.

Po torze poruszają się dwa trójkołowe wózki, na których wsparta jest duraluminiowa belka o przekroju litery H. Czterometrowa długość tej belki umożliwia ułożenie w jednej linii wzorca metra i łąty. Podpory belki na każdym wózku są przesuwane za pomocą urządzeń śrubowych w kierunku pionowym i poprzecznym względem osi toru.

Komparator poziomy wyposażony jest w klosz, umożliwiający wyznaczanie współczynników termicznych taśmy łąty. Podnoszenie temperatury możliwe jest za pomocą grzejników elektrycznych, zaś obniżanie przez umieszczenie pod kloszem pojemników z suchym lodem. Pomiar temperatury odbywa się za pomocą termometrów oporowych przykładanych do taśmy łąty.

Komparator pionowy stanowią 2 mikroskopy zamocowane w płaszczyźnie pionowej w odległości 2 m. Na ścianie są również uchwyty łąty umożliwiające ustawienie jej w pozycji pionowej w płaszczyźnie przedmiotowej mikroskopów. Trzeci uchwyt pozwala na ustawienie w tej płaszczyźnie 2-metrowego wzorca długości. Wzorec mocowany jest w połowie długości. Uchwyt ze wzorcem można odchylać w bok, co umożliwia obserwowanie łąty bez zdejmowania wzorca z uchwytu.

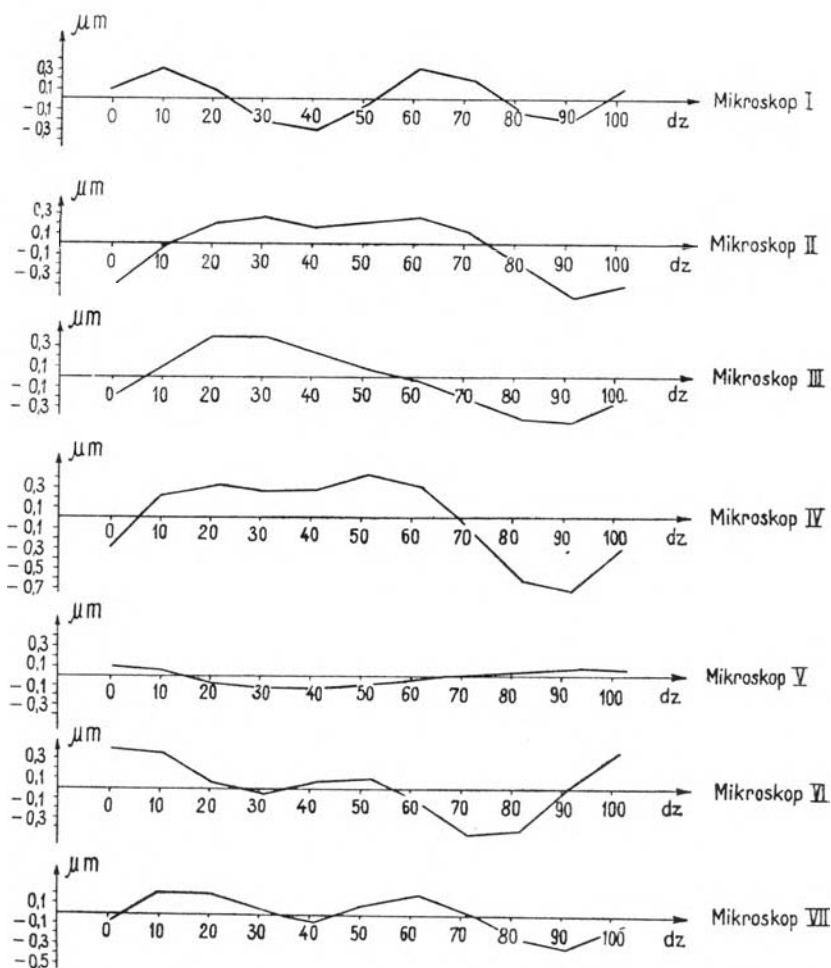
Mikroskopy w komparatorze zbudowano na bazie obiektywów PZO typ MWD-Zs23 o powiększeniu $2,5\times$ oraz mikrometrów okularowych produkcji radzieckiej MOB-1-15 $\times$ IOCT 7856-65, długość śruby mikrometrycznej 8 mm. Całkowite powiększenie mikroskopu wynosi $37,5\times$ zaś nominalna wartość 1 działki mikrometru mikroskopu wynosi $4\text{ }\mu\text{m}$. Pole widzenia równe 3,2 mm zabezpiecza możliwość obserwowania obydwu brzegów kreski łąty.

Przeprowadzono badanie błędów postępowych i okresowych mikrometrów okularowych wszystkich siedmiu mikroskopów.

Błędy okresowe śrub mikrometrycznych wyznaczono z obserwacji stałego interwału równego 40 działkom śruby, mierzonego na różnych miejscach mikrometru odległych od siebie o 10 działek. Stały interwał długości zrealizowano za pomocą precyzyjnej podziałki, ustawionej prostopadle do osi mikroskopu i przesuwanej w prowadnicy ze śrubą ruchu leniwego. Dla każdego mikrometru wykonano 4 serie obserwacji. Wyznaczone błędy okre-

sowe przedstawia rysunek 2. W najbardziej niekorzystnym przypadku wahają się one w granicach od $-0,70 \mu\text{m}$ do $+0,40 \mu\text{m}$.

Błędy postępowe śrub mikrometrycznych zbadano obserwując stały interwał długości równy 1 obrotowi śruby i 2 obrotom śruby, wykonując

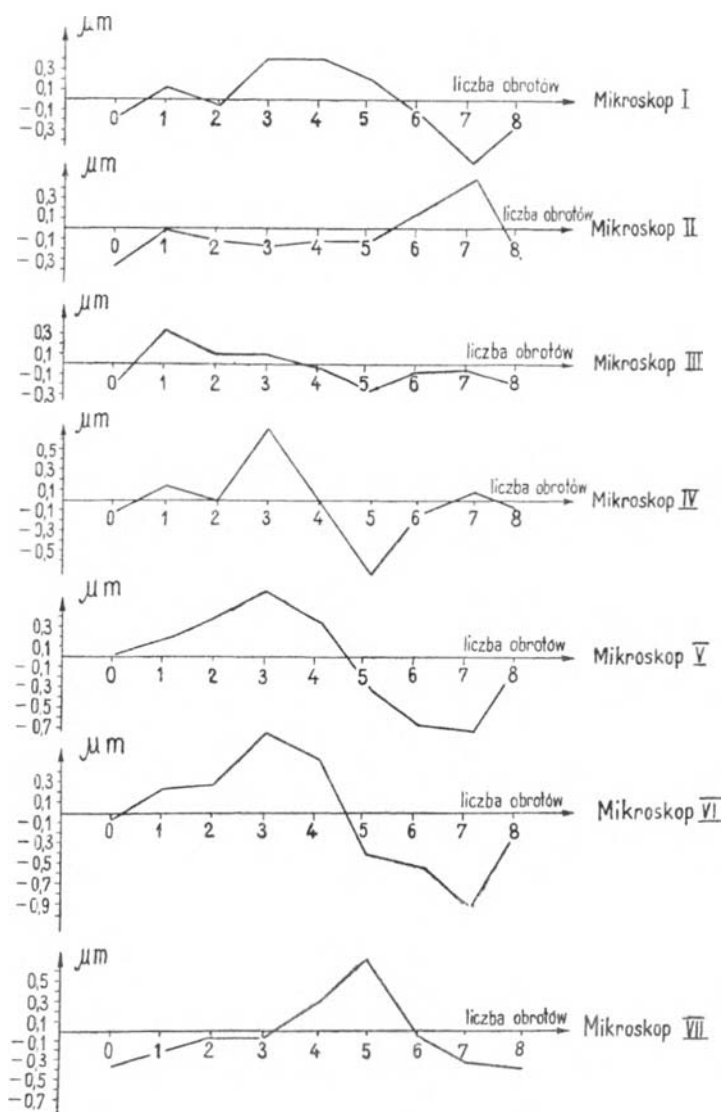


Rys. 2

po 4 serie pomiarów dla każdego interwału. Otrzymane wyniki przedstawia rysunek 3. Maksymalne błędy postępowe mikrometrów zawarte są w granicach od $-0,92 \mu\text{m}$ do $+0,78 \mu\text{m}$.

Biorąc pod uwagę współczesne wymagania odnośnie komparacji łat, określone na około $5 \mu\text{m}$, uzyskane w wyniku badania błędy mikroskopów należy uznać za dopuszczalne w komparatorze łat niwelacyjnych, zwłaszcza

cza że przez zastosowanie odpowiedniej metody obserwacji kresek wzorca i łąty w tym samym miejscu mikrometru omawiane błędy w znacznej części eliminują się.



Rys. 3

Zbudowany komparator wyposażono w 2 normalne wzorce metra. Wzorce wykonano ze starego inwaru f-my Secretan'a i poddano je procesowi sztucznego starzenia. Jeden wzorec wykonany jest w postaci belki

o przekroju litery „H” o wymiarach 8×6 mm z naciętą podziałką milimetrową na całej długości wzorca, drugi wzorec stanowi płaskownik o przekroju 15×8 mm z naciętymi kreskami metra.

Przy zastosowaniu komparatora pionowego najpoważniejszą trudność przedstawia zagadnienie wyznaczania jego długości. Wykonanie tego zadania na drodze bezpośredniego pomiaru metodami optycznymi interferencyjnymi jest obecnie w Polsce niemożliwe ze względu na brak odpowiedniego wyposażenia aparaturowego. Zresztą biorąc pod uwagę potrzebną dokładność rzędu $1 \mu\text{m}$ zastosowanie kosztownych i pracochłonnych metod byłoby w tym przypadku niecelowe. Powstaje więc problem przeniesienia długości z poziomego wzorca kreskowego na komparator pionowy.

Zagadnienie rozwiązano za pomocą specjalnego 2-metrowego przymiaru kreskowego, wykonanego z drzewa dębowego w postaci belki o przekroju 85×40 mm i długości 2100 mm. Użyte drewno jest bardzo dobrze wysuszone, gdyż znajdowało się w pomieszczeniu laboratorium ponad 20 lat. Wykonany przymiar zabezpieczono przed wpływami wilgoci przez pokrycie warstwą lakieru. Kreski przymiaru wykonano na inkrustowanych płytkach mosiężnych.

Przymiar ten mocowany jest na komparatorze pionowym w połowie długości. Elastyczne wydłużenie przymiaru, występujące w połowie dolnej pod wpływem rozciągających sił ciężkości, kompensowane jest siłami ścisakającymi, działającymi w połowie górnej. Można przyjąć, że długość przymiaru przy takim zawieszeniu jest równa długości swobodnej bez odkształceń. Aby za pomocą tego przymiaru można było przenieść długość z komparatora poziomego na pionowy należało znaleźć sposób jego podparcia w położeniu poziomym, przy którym obserwowana długość przymiaru byłaby równa długości swobodnej.

Przymiar w położeniu poziomym swobodnie podparty w dwóch punktach ulega pod działaniem siły ciężkości odkształceniom i przyjmuje kształt przedstawiony na rysunku 4. Punkty *A* i *B* przedstawiają kreski przymiaru, zaś odcinki *AA'* i *BB'* prostopadłe do osi przymiaru. Na osi obojętnej przymiaru nie występują siły podłużne i długość ugiętej osi, którą na rysunku przedstawia krzywa *A'B'*, równa jest długości swobodnej przymiaru, jaką przyjąłby on, gdyby nie działały na niego żadne siły. Poszukiwaną długością swobodną przymiaru jest więc długość ugiętej osi *A'B'*.

Długość cięciwy *A'B'* jest mniejsza od długości krzywej *A'B'*. Różnicę tych długości oznaczmy przez σ . Gdyby kreski przymiaru były położone na osi obojętnej w punktach *A'* i *B'*, jego długość na skutek ugięcia uległaby skróceniu o wielkość σ .

Jeśli odległość punktów podparcia γL jest mniejsza od odległości punk-

tów Airy'ego, odcinki AA' i BB' odchylają się od kierunku pionowego, przy czym obserwowana długość przymiaru AB jest większa od cięciwy $A'B'$ o wielkość $2p$. Równanie

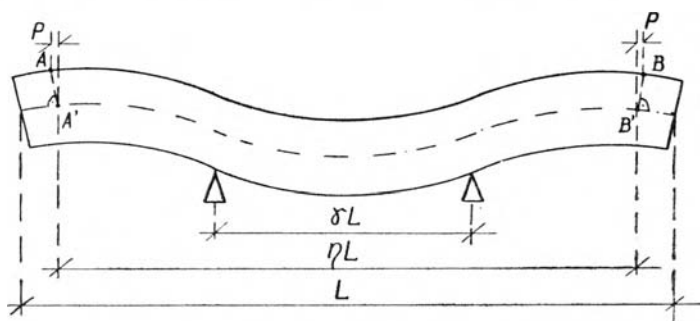
$$2p = \sigma$$

jest warunkiem określającym sposób podparcia, przy którym obserwowana długość jest równa długości swobodnej przymiaru.

Z rozwiązania tego równania dla parametrów wyżej opisanego przymiaru dębowego otrzymano

$$\gamma = 0,57729; \quad \gamma L = 1212,3 \text{ mm.}$$

Wyznaczone teoretycznie punkty podparcia „swobodnej długości” przymiaru sprawdzono empirycznie, porównując długość przymiaru przy róż-



Rys. 4

nych odległościach punktów podparcia z jego długością swobodną, którą zrealizowano obserwując kreski przymiaru pływającego w wodzie, a następnie ułożonego na gęsto rozmieszczonych jednakowych sprężynach. Wyznaczone z tych obserwacji rozmieszczenie punktów podparcia przymiaru, odpowiadające swobodnej jego długości, jest zgodne z wyżej przedstawioną wartością teoretyczną.

Przystępując do opracowania metody komparacji precyzyjnych łąt niwelacyjnych na zbudowanym komparatorze, przeprowadzono badania pozwalające ustalić właściwe położenie łąty podczas komparacji.

W tym celu przeprowadzono:

1. Badanie zmian długości łąt w zależności od sposobu ich podparcia w położeniu poziomym.
2. Badanie różnicy długości metra łąty w położeniu pionowym i poziomym łąty.

Odnosnie punktu 1 badaniom poddano 4 łąty: 2 firmy Zeiss Jena i 2 firmy Wild. Na komparatorze poziomym wyznaczono odległości pomiędzy

kreskami położonymi w pobliżu końców łąty (około 3 m) stosując 3 sposoby podparcia łąty:

- 1) podparcie na końcach łąty,
- 2) podparcie w punktach Bessela,
- 3) podparcie w trzech punktach.

Dla każdej łąty wykonano 4 serie takich obserwacji. Wyznaczone w ten sposób różnice długości łąty pomiędzy 3 i 1 sposobem podparcia oraz pomiędzy 3 i 2 sposobem podparcia kształtują się jak pokazano w tablicy 1.

Tablica 1

Firma	Nr łąty	Różnice długości przy sposobach podparcia [μm]		Średni błąd wyniku [μm]
		3—1	3—2	
Zeiss	34382	+85,2	+1,0	$\pm 0,86$
Zeiss	34383	+88,4	+1,2	$\pm 2,19$
Wild	32	+54,4	-8,0	$\pm 1,20$
Wild	77	+57,3	-8,8	$\pm 1,92$

Badania określone w punkcie 2 przeprowadzono przy użyciu opisanego już 2-metrowego przymiaru-wzorca, służącego do przenoszenia długości z komparatora poziomego na pionowy. Na obu komparatorach obserwowano również 2-metrowe odcinki łąt. W pozycji poziomej łąty podpierano w punktach Bessela. Obserwacje wykonywano w seriach zamkniętych, a mianowicie obserwowano wzorzec, łąty i znów wzorzec na komparatorze poziomym, następnie wykonywano obserwacje w takim samym porządku na komparatorze pionowym i wreszcie po raz drugi na komparatorze poziomym. Dla wszystkich łąt wykonywano po 4 serie takich obserwacji.

Badaniu poddano ogółem 10 łąt, otrzymując różnice długości 2-metrowego odcinka łąt w następujących granicach:

dla łąt Zeissa ($H-V$) od +8,6 do +21,6 μm ,

dla łąt Wilda ($H-V$) od +4,0 do +7,0 μm .

Analiza uzyskanych wyników pozwala wnioskować, że wszystkie łąty wykazują podobny charakter zmian długości w zależności od ich położenia i sposobu podparcia, lecz zjawisko występuje z niejednakową wielkością u poszczególnych typów łąt, a nawet u poszczególnych egzemplarzy łąt jednego typu i firmy. Łąty podparte w punktach Bessela są dłuższe względem ich właściwej długości w położeniu pionowym, zaś podparte na końcach stają się za krótkie. Punkty podparcia w położeniu poziomym, przy których łąty przyjmują właściwą długość, znajdują się na ogół w większej odległości niż punkty Bessela, lecz w poszczególnych egzemplarzach łąt występują w różnych odległościach. Rozbieżności badanego

zjawiska są bardzo znaczne wobec pożądanej dokładności komparacji łąty rzędu 5 μm .

Przeprowadzone badania wykazują, że wyznaczanie średniego metra łąty precyzyjnej należy przeprowadzić w pozycji pionowej, w jakiej jest ona używana w terenie.

Średni metr łąty należy zdefiniować jako średnią z długości wszystkich metrowych odcinków łąty. Wyznaczenie takiej wielkości wymagałoby obserwacji wszystkich kresek łąty i byłoby bardzo pracochłonne. Praktycznie wydaje się celowe ograniczenie się do obserwacji tylko decymetrowych kresek łąty.

Można wykazać, że przy 3-metrowej długości łąty kreski na środkowym metrowym odcinku łąty nie mają wpływu na wielkość średniego metra łąty. Dla wyznaczenia średniego metra łąty wystarczy więc obserwować tylko 2-metrowe odcinki łąty. Oznaczając obserwowane długości 2-metrowych odcinków łąty przez L_i otrzymujemy średnią długość odcinków 2-metrowych na łącie

$$L_{\text{sr}} = \frac{1}{n} \sum_1^n L_i,$$

zaś średni metr łąty wyrazi się wzorem

$$l_{\text{sr}} = \frac{1}{2} L_{\text{sr}}.$$

Ponieważ obserwacja wszystkich 2-metrowych odcinków łąty L_i w pozycji pionowej wymagałaby skomplikowanych urządzeń do przesuwania 3-metrowej łąty w płaszczyźnie pionowej, zdecydowano się obserwować w pozycji pionowej jeden wybrany 2-metrowy odcinek łąty D , zaś różnicę długości odcinka D i długości L_{sr} obserwować w pozycji poziomej. Ponieważ obserwacja tego 2-metrowego odcinka łąty w pozycji pionowej odgrywa wyjątkowo ważną rolę, powinna być ona wykonana możliwie najstaranniej. W celu podniesienia dokładności celowania naklejono na taśmę inwarową specjalne znaczki w pobliżu kreski 0,5-metrowej i 2,5-metrowej, otrzymując na taśmie łąty odcinek D o długości bliskiej 2 m.

Oznaczając odległość między naniesionymi znaczkami w pozycji pionowej przez D_V , zaś w pozycji poziomej przez D_H otrzymamy dla średniego metra łąty w pozycji pionowej wzór:

$$l_{\text{sr}} = \frac{1}{2} [D_V + (L_{\text{sr}} - D_H)],$$

przy czym wielkość D_V wyznaczana jest na komparatorze pionowym, natomiast różnica $(L_{\text{sr}} - D_H)$ wyznaczana jest na komparatorze poziomym.

Wyznaczanie odległości między znaczkami w pozycji pionowej D_V wymaga wykonania następujących czynności:

- 1) wyznaczenia długości komparatora poziomego za pomocą wzorca normalnego inwarowego,
- 2) wyznaczenia długości 2-metrowego wzorca podpartego w punktach „swobodnej długości”,
- 3) powtórzenia czynności pierwszej,
- 4) wyznaczenia długości komparatora pionowego za pomocą wzorca 2-metrowego,
- 5) wyznaczenia odległości D_V na badanej łacie (można wykonać dla kilku łąt),
- 6) powtórzenie czynności czwartej,
- 7) powtórzenie czynności pierwszej, drugiej i trzeciej.

Przeprowadzono doświadczalne badanie 10 łąt i dla oceny dokładności wyznaczenia średniego metra łąty określono błędy wyznaczenia wielkości D_V , D_H i L_{sr} .

Obserwacje wyznaczenia wartości D_V wykonano w 3 lub 4 zamkniętych seriach wg wyżej opisanego programu. Analiza wyników wykazała wysoką dokładność wyznaczania wielkości D_V . Średni błąd wyznaczenia D_V z jednej serii obserwacji wynosi

$$m_{D_V} = \pm 3,2 \text{ } \mu\text{m}.$$

Pomiar różnicy ($L_{sr} - D_H$) wykonano na komparatorze poziomym, obserwując odcinki 2-metrowe między decymetrowymi kreskami na obu podziałach i długość D_H pomiędzy naniesionymi znaczkami na taśmie. Wykonywano serie obserwacji symetryczne w czasie, obserwując kolejne odcinki L_i tam i z powrotem. Zatem każdy odcinek L_i był obserwowany dwukrotnie. Na podstawie analizy odchylek obserwacji parami tych samych odcinków łąty określono średni błąd pomiaru odcinka L na łącie, który zawiera się w granicach

$$m_0 \text{ od } \pm 1,0 \text{ } \mu\text{m} \text{ do } \pm 4,2 \text{ } \mu\text{m}.$$

Odchyłki $v = L_{sr} - L$ pozwalają obliczyć średni błąd 2-metrowych odcinków łąty, który dla zbadanych łąt kształtuje się w granicach

$$m_L \text{ od } \pm 7,0 \text{ } \mu\text{m} \text{ do } \pm 33,4 \text{ } \mu\text{m}.$$

Dla występującej we wzorze na średni metr łąty wartości L_{sr} otrzymujemy średni błąd

$$m_{L_{sr}} = \frac{1}{\sqrt{n}} m_L$$

kształtujący się w granicach

$$m_{L_{sr}} \text{ od } \pm 1,3 \text{ } \mu\text{m} \text{ do } \pm 7,4 \text{ } \mu\text{m}.$$

Potrzebną jeszcze wartość średniego błędu m_{D_H} pomiaru odcinka D_H na komparatorze poziomym obliczono na podstawie analizy wewnętrznej zgodności obserwacji, otrzymując

$$m_{D_H} = \pm 2,0 \text{ } \mu\text{m}.$$

Dla oceny dokładności opracowanej metody wyznaczania średniego metra łąty otrzymujemy na podstawie wzoru definiującego tę wielkość wyrażenie dla średniego błędu

$$m_{l_{sr}} = \frac{1}{2} \sqrt{m_{D_V}^2 + m_{L_{sr}}^2 + m_{D_H}^2}.$$

Dla zbadanych 10 łąt otrzymano następujące wartości średniego metra łąty i średnie błędy wyznaczenia tej wielkości

		l_{sr}	$m_{l_{sr}}$
Zeiss	34.382	1 m + 10,0 μm	$\pm 1,9 \text{ } \mu\text{m}$
Zeiss	34.383	1 m + 25,6 μm	$\pm 2,0 \text{ } \mu\text{m}$
Wild	31	1 m - 40,8 μm	$\pm 2,6 \text{ } \mu\text{m}$
Wild	32	1 m + 32,5 μm	$\pm 1,8 \text{ } \mu\text{m}$
Zeiss	24.164	1 m + 10,4 μm	$\pm 2,0 \text{ } \mu\text{m}$
Zeiss	24.165	1 m + 7,5 μm	$\pm 2,0 \text{ } \mu\text{m}$
Zeiss	17.624	1 m - 5,8 μm	$\pm 2,0 \text{ } \mu\text{m}$
Zeiss	17.625	1 m - 12,2 μm	$\pm 2,0 \text{ } \mu\text{m}$
ГВГК	8522	1 m + 63,0 μm	$\pm 4,2 \text{ } \mu\text{m}$
ГВГК	8523	1 m + 79,1 μm	$\pm 3,2 \text{ } \mu\text{m}$

Należy podkreślić, że błąd $m_{l_{sr}}$ charakteryzuje dokładność wyznaczenia średniego metra łąty w jednostce wzorca normalnego.

Uzyskane dokładności komparowania łąt precyzyjnych najzupełniej zabezpieczają obecne potrzeby w tym zakresie.

L I T E R A T U R A

- [1] Jasnorzewski J.: Metrologia długości. PPWK, Warszawa 1959.
- [2] Meszczerskij I. N., Entin I. I.: Oszybki niwielierowania wyzwanij primieniem inwarynych riejek. Trudy CNIIGAIK; wypusk 147, 1962.
- [3] Ochsenhirt H.: Zur Untersuchung von Feinnivellierlatten mit Invarband. Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 3, 1956.
- [4] Peschel H.: Untersuchungen von Invarnivellierlatten der Firma C. Zeiss. Zeitschrift für Instrumentenkunde, Heft 2, 1938.
- [5] Peschel H.: Komparator für Invarband-Nivellierlatten. Vermessungstechnik, Heft 8, 1963.

Przedstawiono na I Seminarium na temat metrologii geodezyjnej

Rękopis złożono w Redakcji w grudniu 1973 r.

ЗБИГНЕВ ЗОМБЕК
БОГУСЛАВА КАЛИНОВСКА

ГОРИЗОНТАЛЬНО-ВЕРТИКАЛЬНЫЙ КОМПАРАТОР И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО МЕТРА РЕЙКИ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ПОЛОЖЕНИИ

Р е з ю м е

В статье описывается строение и конструкция горизонтально-вертикального компаратора нивелирных прецизионных реек, построенного в Институте высшей геодезии и геодезической астрономии Варшавского политехнического института.

Затем представлен разработанный метод перенесения длины с горизонтально-го компаратора на вертикальный. Для разработки метода компарации на построенном компараторе были проведены исследования, позволяющие определить правильное размещение рейки во время компарации. Для этого проводились:

1. исследование изменения длины реек в зависимости от способа их закрепления в горизонтальном положении;
2. исследование разности длины метра рейки в горизонтальном и вертикальном положении.

В последней части статьи описан метод определения среднего метра рейки, а также представлена оценка точности разработанного метода. Результаты были подтверждены исследованием десяти экземпляров реек.

ZBIGNIEW ZĄBEK
BOGUSŁAWA KALINOWSKA

HORIZONTAL VERTICAL COMPARATOR AND DETERMINING THE MEAN LENGTH OF ONE METRE OF THE LEVELLING ROD IN VERTICAL POSITION

S u m m a r y

In this article construction of the horizontal-vertical comparator of a precise levelling rod, made at the Institute of Higher Geodesy and Geodetic Astronomy of the Warsaw Technical University is discussed.

Next an elaborated method of transferring the length from a horizontal comparator to a vertical one is presented. In order to elaborate the method of comparison on this comparator the following series of tests were carried out which determined the proper position of the rod during comparison:

1. studies on the variations of the rod length according to the way they were supported in a horizontal position,
2. studies on the discrepancy between the length of one meter of the rod in horizontal and in vertical positions.

In the last part of the paper there is described the method of determining the mean length of one metre of the rod; there is also presented an evaluation of the accuracy of the elaborated method.

The results were supported by testing 10 rods.