

Józef Beluch*, Mariusz Frukacz*, Józef Mróz*,
Andrzej Pokrzywa*, Tadeusz Szczutko*

Badania precyzyjnego sprzętu do niwelacji w geodezyjnym laboratorium metrologicznym AGH**

1. Wstęp

Geodezyjne Laboratorium Metrologiczne Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH posiada wyposażenie mogące służyć do badania precyzyjnego sprzętu do niwelacji. Wyposażenie to tworzą:

- stanowisko do sprawdzania i nadawania klasy niwelatorów,
- komora do wyznaczania współczynnika rozszerzalności termicznej wstęgi inwarowej łąt niwelacyjnych,
- baza pozioma do sprawdzania niwelatorów z wykorzystaniem interferometru laserowego HP 5529A,
- komparator pionowy do kalibracji łąt niwelacyjnych wykorzystujący interferometr HP 5529A [5].

Badaniami objęto niwelatory oraz łąty stanowiące zestaw sprzętu do niwelacji.

2. Zakres badań

2.1. Badanie niwelatorów

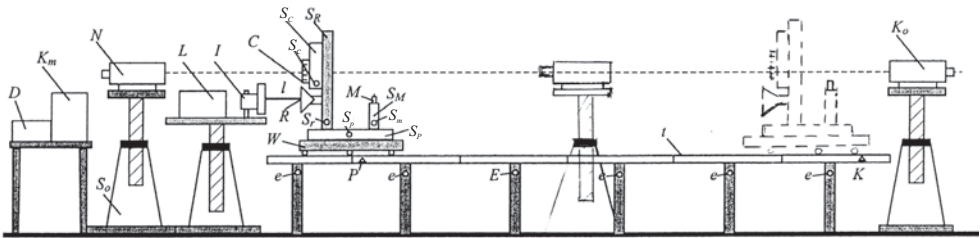
W celu nadania klasy niwelatorom wykorzystywanym do realizacji podstawowej i szczegółowej osnowy wysokościowej wykonuje się pomiary odcinka testowego o długości 10 kilometrów. Pomiary te mogą być wykonywane w laboratorium z wykorzystaniem specjalnie zaprojektowanego stanowiska. W pomiarze tym wykorzystuje się komplety łąt, które mają być stosowane do pomiarów w terenie.

* Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Opracowanie wykonane w ramach grantu badawczego KBN 18.25.150.677

Interferometr laserowy wykorzystano między innymi do badania warunków geometrycznych i funkcjonowania niwelatorów. Możliwość taka istnieje dzięki temu, że za jego pomocą mogą być precyzyjnie mierzone długości odcinków poziomych, a także pionowych.

Do badań wykorzystuje się tor poziomy (rys. 1), po którym porusza się wózek pomiarowy z pionową precyzyjną łątką i pryzmatem należącym do zestawu interferometru [1]. W zależności od przedmiotu badań niwelator może być ustawiany albo przed początkiem toru, albo symetrycznie do punktu początkowego i końcowego toru, ale poza jego osią.



Rys. 1. Schemat interferencyjnego systemu pomiarowego do badania stałości osi celowej niwelatorów: *I* – interferometr, *L* – laser, *K_m* – komputer, *D* – drukarka, *R* – pryzmat interferometru laserowego, *C* – precyzyjna podziałka pomiarowa, *S_c* – suport pionowy podziałki pomiarowej, *S_r* – śruba suportu pionowego podziałki, *S_r* – suport pionowy pryzmatu, *S_r* – śruba suportu pionowego pryzmatu, *M* – mikroskop Abbego, *S_m* – suport pionowy mikroskopu, *S_m* – śruba suportu pionowego mikroskopu, *S_p* – suport poziomy układu pomiarowego, *S_p* – śruba suportu poziomego, *S_o* – kolumna obserwacyjna, *W* – wózek pomiarowy, *t* – tor wózka pomiarowego, *E* – czujnik do monitorowania środowiska pomiarowego (temperatura, ciśnienia i wilgotności), *e* – czujniki do pomiaru temperatury, *K_o* – kolimator, *N* – badany niwelator, *P* – punkt początkowy toru, *K* – punkt końcowy toru

Przedmiotem badań mogą być poszczególne elementy funkcjonalne niwelatora takie jak:

- 1) luneta:
 - symetryczność klina kresek,
 - zmiany położenia osi celowej pod wpływem ogniskowania,
 - zmiany położenia osi celowej pod wpływem zmian termicznych;
- 2) kompensator:
 - wyznaczenie zakresu działania kompensatora,
 - błędy systematyczne kompensatora powstające przy wychyleniu pionowej osi obrotu niwelatora, czyli:
 - błąd spowodowany zmianą wysokości punktu głównego przedmiotowego przy wycelowaniu na łątkę wstecz i w przód,

- błąd kompensacji spowodowany zmianą długości ogniskowej w lunecie teleskopowej przy zmianie długości celowej,
 - błąd spowodowany zmianą parametru „s” w czasie pomiaru t.j. parametru występującego w warunku kompensacji $f \cdot \alpha = s \cdot \beta$,
 - błąd spowodowany niedokładnym justowaniem kompensatora,
 - błąd quasi-horyzontu przy pionowym ustawieniu osi obrotu niwelatora,
 - czułość kompensatora;
- 3) mikrometr:
- wartość jednej działki,
 - ocena martwego ruchu,
 - błąd runu.

2.2. Badanie łąt

Badanie precyzyjnych łąt niwelacyjnych obejmuje:

- wyznaczenie współczynnika rozszerzalności termicznej wstęgi inwarowej łąty w komorze termicznej,
- wyznaczenie metra średniego na komparatorze pionowym,
- wyznaczenie zera łąty (stopka łąty),
- ocena użytkowania łąt na podstawie wyników kalibracji.

Wyznaczenie metra średniego łąty poprzedzać musi wyznaczenie współczynnika rozszerzalności termicznej wstęgi inwarowej łąty – parametr ten jest wprowadzany do programu obsługującego interferometr laserowy. Układ trzech precyzyjnych czujników temperatury umieszczonych na stopce, w środku i na górze łąty pozwala automatycznie uwzględniać zmiany długości wstęgi inwarowej spowodowane zmianami temperatury w czasie kalibracji danej łąty.

Równocześnie z wyznaczeniem metra średniego dla danej łąty wyznaczanie jest wypadkowe przesunięcie zera podziału łąty w stosunku do kresek podziału. Obserwacje na łącie są wykonywane w ustalonych interwałach odległości zależnych od typu łąty i rodzaju kodu. Odczyt położenia kresek podziału łąty odbywa się za pomocą zamocowanej na sztywnej kolumnie lunety Abbego. Położenie wózka z lunetą rejestruje się za pomocą interferometru laserowego HP 5529A [2, 4].

Dla łąt kodowych firmy Nedo [3] produkowanych dla firm wytwarzających niwelatory cyfrowe obserwacje położenia kresek kodu wykonuje się:

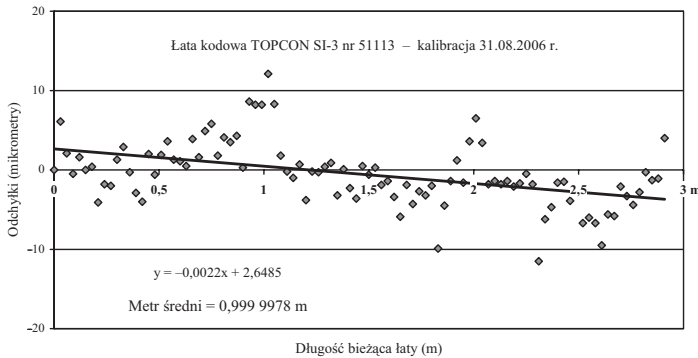
- Zeiss – co 2 cm;
- Topcon – co 3 cm;
- Leica – średnio co 5 cm – odległości mierzone są wielokrotnością modułu 2,025 mm.

Dla łąt klasycznych Carl Zeiss Jena na lewym i prawym podziale wykonuje się obserwacje kresek co 10 cm; biorąc pod uwagę przesunięcie podziałów daje to zagęszczenie punktów pomiarowych średnio co 5 cm. Dla łąt klasycznych oraz Nedo/Topcon obliczenie metra średniego łąty odbywa się przez aproksymację wyników pomiaru kresek podziału za pomocą prostej regresji; dla łąt kodowych Nedo/Zeiss oraz Nedo/Leica stosuje się zmodyfikowany algorytm opisany w [2].

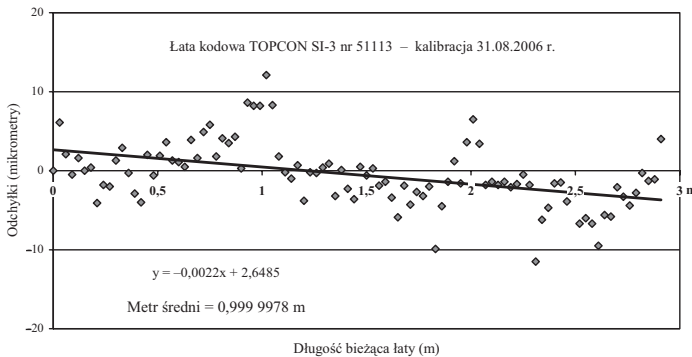
3. Przykłady kalibracji łąt

3.1. Kalibracja nowej pary łąt TOPCON SI-3

Przedstawiony zostanie przykład kalibracji pary łąt kodowych firmy TOPCON (rys. 2 i 3).



Rys. 2. Wyniki kalibracji nowych łąt kodowych Topcon SI-3, nr 51113

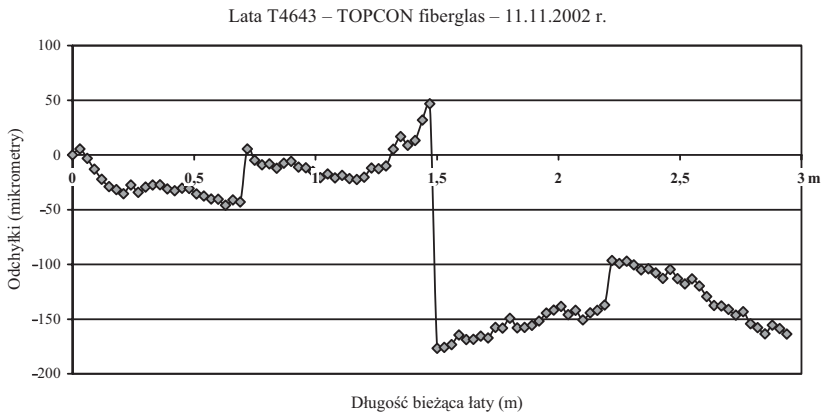


Rys. 3. Wyniki kalibracji nowych łąt kodowych Topcon SI-3, nr 51114

Przed kalibracją w komorze termicznej [5] wyznaczono współczynniki rozszerzalności termicznej wstęgi inwarowej łąt otrzymując wyniki: łąta 51113 – $\alpha = 0,54 \mu\text{m}/\text{m}/1^\circ\text{C}$, łąta 51114 – $\alpha = 0,59 \mu\text{m}/\text{m}/1^\circ\text{C}$.

3.2. Kalibracja łąt fiberglasowych

Do niwelacji sieci szczegółowych klasy III i IV oraz do zastosowań inżynierskich można wykorzystywać niwelatory kodowe w komplecie z łątami fiberglasowymi. Zazwyczaj są to łąty składane z dwóch odcinków po 1,5 metra. Wyniki kalibracji składanej łąty fiberglasowej przedstawiono na rysunku 4.



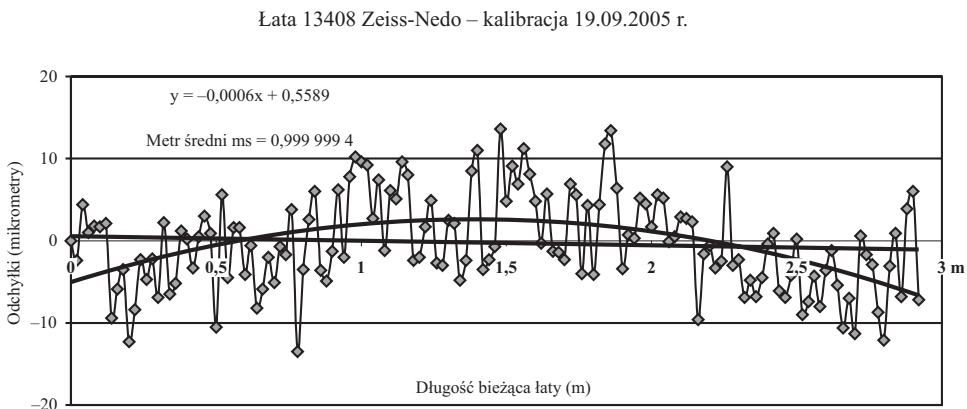
Rys. 4. Przykład wyników kalibracji fiberglasowej łąty kodowej Topcon $2 \times 1,5$ m

Zgodnie z oczekiwaniem na styku dwóch części łąty występuje przesunięcie wykresu. Można zauważyć, że skoki na wykresie występują również dla długości bieżącej łąty 0,75 i 2,25 m. Oznacza to, że podział na łątach tego typu składany jest z odcinków podziału kodowego o długości 0,75 m.

3.3. Ocena użytkowania łąt na podstawie wyników kalibracji

Sprzęt geodezyjny służący do pomiarów, zwłaszcza tych o najwyższej precyzji, powinien być odpowiednio użytkowany, aby nie następowało pogorszenie jego parametrów dokładnościowych w trakcie eksploatacji. Dotyczy to zarówno niwelatorów, jak i łąt. Podział łąt powinien być chroniony przed mechanicznym uszkodzeniem powodującym uszkodzenie kresk kodowych [4]. Stosowanie w czasie wykonywania niwelacji podpór mocowanych w środku profilu aluminiowego two-

rzącego obudowę łąty powoduje jego ściskanie, a w konsekwencji wygięcie łąty górą ku przodowi. Przykład kalibracji łąty zgiętej przez użytkownika jest przedstawiony na rysunku 5. Pasma punktów pomiarowych na łącie układa się w formie łuku zależnego od siły nacisku obejmującej podpory. W wielu przypadkach kalibracja łąty będzie stanowić ocenę sposobu jej użytkowania w terenie. Dla uniknięcia opisanych deformacji należy stosować podpory mocowane u góry łąty. Dla łąty Zeiss/Nedo nr 13408 stwierdzono mechaniczne wygięcie profilu o strzałce 3 mm. Na wykresie wyników kalibracji widoczne jest ugięcie pasma punktów obserwacyjnych o strzałkę ok. $10\mu\text{m}$ odpowiadające wygięciu mechanicznemu łąty.



Rys. 5. Wyniki kalibracji łąty zniekształconej podczas użytkowania

4. Modyfikacja technologii kalibracji na komparatorze pionowym z wykorzystaniem interferometru laserowego hp 5529a

Dotychczasowa technologia kalibracji łąt niwelacyjnych opiera się na obserwacji optycznej kresek podziału łąty i rejestracji położenia układu obserwacyjnego za pomocą interferometru HP 5529A.

Technologia pomiaru przedstawia się następująco:

- wyznaczenie kształtu kolumny wzdłuż osi celowej lunety Abbego za pomocą zestawu do pomiaru pochylenia należącego do systemu HP 5529A,
- pomiar kształtu kolumny w kierunku poprzecznym,
- właściwy pomiar liniowy,
- obliczenie metra średniego łąty z uwzględnieniem kształtu kolumny.

W fazie doświadczalnej znajduje się opracowanie zmian układu pomiarowego. Jest to związane z tym, że obserwacje optyczne są uciążliwe, czasochłonne, a ponadto obciążone są błędami osobowymi [2]. Wykonano pierwsze doświadczenia z układem, w którym lunetę Abbego zastąpiono kamerą CCD (rys. 6). Do kamery zastosowano obiektyw mikroskopowy o ogniskowej 25 mm.



Rys. 6. Kamera CCD z obiektywem pomiarowym

Proces kalibracji łąty z wykorzystaniem kamery CCD przedstawia się następująco:

1. celowanie przybliżone na kreskę podziału kodowego lub klasycznego – zapis położenia kamery w układzie pomiarowym interferometru – odczyt L_{int} ,
2. zapis obrazu do pamięci komputera,
3. wygładzenie obrazu kreski zapisanego za pomocą kamery – usunięcie wpływu nierówności, uszkodzeń, odbłasków świetlnych,
4. pomiar przesunięcia kreski w stosunku do środka obrazu $dKam$,
5. obliczenie położenia kreski podziału: $D = L_{int} + dKam$,
6. obliczenie metra średniego z uwzględnieniem kształtu kolumny komparatora.

Niedogodnością dotychczasowej technologii kalibracji łąt jest dwuetapowy proces pomiaru składający się z:

1. wzorcowania kolumny komparatora przez pomiar pochylenia,
2. właściwego pomiaru liniowego.

Obie czynności są wykonywane w pewnym odstępie czasu, co oznacza, że mogą nastąpić zmiany kształtu belki spowodowane np. zmianami temperatury w pomieszczeniu komparatora. Wykonanie pomiaru kształtu belki równocześnie z pomiarem liniowym powinno zwiększyć dokładność kalibracji łąt wszelkich typów.

Tworzony układ pomiarowy bazujący na wykorzystaniu interferometru HP 5529A zawiera:

- dodatkowy układ pomiarowy uzyskany przez rozdzielenie promienia laserowego na dwie wiązki,
- kartę pomiarową HP 10887A i osobny układ optyczny.

Wykonano już pierwsze doświadczenia związane z precyzyjnym dostrojeniem opisanego układu wskazujące na pomyślne zakończenie zaplanowanych zamierzeń.

Literatura

- [1] Beluch J., Frukacz M., Mróz J., Pokrzywa A., Szczutko T.: *Badanie stałości osi celowej niwelatorów z wykorzystaniem interferometru laserowego*, Technical Sciences, Publisher UWM, Olsztyn, ISSN 1732-8314, 2005, s. 273–282.
- [2] Beluch J., Frukacz M., Mróz J., Pokrzywa A., Szczutko T.: *Modyfikacja algorytmu obliczeń wyników kalibracji łąt kodowych wykonywanych za pomocą interferometru laserowego HP 5529A*. XIX Jesienna Szkoła Geodezji „Geoinformacja dla wszystkich” Polanica-Zdrój, 22–24 września 2005 r., Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej nr 114, Seria Konferencje nr 45, Wrocław, 2005, s. 13–20.
- [3] Fischer T., Fischer W.: *Manufacturing of High Precision Leveling Rods*. Jubilee seminar: 25 years of Motorical Levelling, Geodesy and Surveying in the Future, Gavle, Sweden, 1999.
- [4] Janusz J., Janusz W.: *Wyniki sprawdzenia łąt kodowych na pionowym komparatorze interferometrycznym z wykorzystaniem niwelatora cyfrowego – Dbajmy o łąty*. „Geodeta” Magazyn geoinformacyjny nr 12 (115) grudzień 2004, s. 52–53.

- [5] Pokrzywa A., Mróz J., Szczutko T., Ruchel J., Przewięźlikowska A.: *Technologia kompleksowego sprawdzania łat niwelacyjnych z wykorzystaniem interferometru laserowego HP 5529A*. Geodezja. Półrocznik Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, t. 6 z. 1, 2000 .