

Andrzej Pokrzywa*, Józef Beluch*, Mariusz Fukacz*

ANALIZA PORÓWNAWCZA
WYZNACZENIA PARAMETRÓW GEOMETRYCZNYCH
PRECYZYJNYCH KODOWYCH ŁAT NIWELACYJNYCH
NA KOMPARATORZE PIONOWYM I POZIOMYM**

1. Wstęp

Precyzyjne łaty niwelacyjne wykorzystywane do wyznaczania różnic wysokości między punktami osnowy wysokościowej lub między punktami na obiektach technicznych wymagają, zgodnie z Polską Normą BN-78/8770-07 i Instrukcją techniczną G-2, okresowego sprawdzania ich parametrów fizycznych, tj. siły naciągu wstęgi inwarowej, współczynnika liniowej rozszerzalności termicznej oraz parametrów geometrycznych obudowy i zamocowanej w niej wstęgi inwarowej.

Sprawdzanie siły naciągu wstęgi inwarowej jest pierwszą, podstawową czynnością poprzedzającą badanie warunków geometrycznych oraz wyznaczanie parametrów fizycznych i geometrycznych precyzyjnych łat niwelacyjnych. Siła naciągu wstęgi inwarowej precyzyjnych łat geodezyjnych sprawdzana jest i regulowana w Geodezyjnym Laboratorium Metrologicznym (GLM) Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska (WGGiŚ) AGH za pomocą specjalnego klucza z dynamometrem firmy Leica. Regulacja siły naciągu F_n wykonywana jest wówczas, gdy $F_n \notin \langle 15 \text{ N}, 20 \text{ N} \rangle$.

Wyznaczanie parametrów geometrycznych precyzyjnych łat niwelacyjnych obejmuje:

1. badanie stopki łąty,
2. badanie prostoliniowości konstrukcji nośnej obudowy i wstęgi inwarowej łąty,
3. określenie współczynnika liniowej rozszerzalności termicznej wstęgi inwarowej,
4. kalibrację łąty, w tym:
 - wyznaczenie miejsca zera łąty,
 - wyznaczenie skali podziału łąty na podstawie odchyłek od interwału pomiarowego łąty.

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

** Praca wykonana w ramach badań statutowych nr 11.11.150.478

Część z tych badań może być wykonana zarówno przy poziomym, jak i pionowym ustawieniu łąty natomiast pozostałe – wyłącznie przy pionowym ustawieniu.

2. Wyznaczanie parametrów geometrycznych

Badanie płaszczyzny stopki łąty

Polega na wyznaczeniu odkształceń stopki łąty w czterech punktach rozmieszczonych równomiernie na okręgu o środku S i promieniu $r = r_o - 5$ mm względem punktu S . Punkt S to punkt przebiecia płaszczyzny stopki łąty przez oś geometryczną wstęgi inwarowej łąty, natomiast r_o to promień otworu ostrogi łąty. Badanie to może być wykonane przy wykorzystaniu interferometru laserowego zarówno przy poziomym, jak i pionowym ułożeniu łąty i zdaniem autorów jego dokładność oraz uzyskiwane wyniki nie zależą od sposobu zamocowania łąty (poziom lub pion). W Geodezyjnym Laboratorium Metrologicznym WGGiŚ AGH badanie to realizowane jest z wykorzystaniem interferometru dla łąty ustawianej pionowo na kulistym bolcu (o średnicy 10 mm).

Badanie prostoliniowości konstrukcji nośnej obudowy wstęgi inwarowej łąty

Wykonywane jest w pionowej pozycji łąty w prostopadłych płaszczyznach wyznaczanych przez osie celowe dwóch sprawdzonych i zrektyfikowanych teodolitów zamocowanych na stabilnych kolumnach obserwacyjnych. Pomiar prostoliniowości obudowy łąty wykonywany jest z wykorzystaniem podziałki milimetrowej odczytywanej w dwóch położeniach lunety teodolitu. Badanie to prowadzone jest dla obu krawędzi płaszczyzny czołowej łąty kodowej (od strony opisu), w równomiernie rozmieszczonych wzdłuż łąty punktach (co 200 mm, licząc od stopki łąty). Sprawdzanie prostoliniowości obudowy wstęgi inwarowej łąty można wykonywać również przy poziomym ułożeniu łąty, za pomocą niwelatora lub teodolitu i podziałki milimetrowej, mierząc odchylenia od prostej wyznaczonej przez początek i koniec krawędzi łąty w dwóch prostopadłych płaszczyznach (czołowej i bocznej). Należy zaznaczyć, że w celu minimalizacji odkształceń pod wpływem własnego ciężaru łąta powinna być podparta w dwóch punktach, tzw. punktach Bessela, których położenie uzależnione jest od długości badanej łąty traktowanej jako belki. Wyznaczenie punktów Bessela dla łąt kodowych jest dodatkowo utrudnione ze względu na nierównomierny rozkład masy łąty, gdyż na jednym jej końcu zamocowana jest stalowa stopka o istotnej dla rozważań statycznych masie. Ponadto podparcie łąty w punktach Bessela minimalizuje zmianę długości, lecz nie likwiduje ugięcia profilu łąty.

Badanie prostoliniowości wstęgi inwarowej łąty

Realizowane jest za pomocą podziałki milimetrowej i teodolitu ustawionego na stanowisku pomiarowym. Płaszczyzna czołowa łąty ustawiana jest równolegle do płaszczyzny celowania. Obserwacje odkształceń wykonywane są w osi pionowej wstęgi, w jej punkcie początkowym i końcowym oraz wzdłuż całej wstęgi co 200 milimetrów, licząc od stopki

łaty. Analogicznie do opisanego wyżej sposobu badania korpusu łaty w pozycji poziomej można przeprowadzić także sprawdzenie prostoliniowości wstęgi inwarowej łaty.

Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczane są maksymalne odchyłki od linii prostej korpusu łaty i wstęgi inwarowej. Poprzez porównanie z dopuszczalną strzałką ugięcia ($f_{dop} = 2 \text{ mm}$) następuje kwalifikacja łaty do precyzyjnych pomiarów geodezyjnych. Zdaniem autorów, pozycja pionowa jest optymalna do przeprowadzenia badań konstrukcji nośnej łaty i jej wstęgi inwarowej. Taka pozycja łaty jest zgodna z ustawieniem łąt w pomiarach terenowych przewyższeń między punktami geodezyjnymi. Ponadto, wykonując powyższe badania w pozycji poziomej, nie unikniemy konieczności pionowego ustawienia łaty za pomocą teodolitów w celu sprawdzenia i rektyfikacji libeli okrągłej.

Wyznaczanie współczynnika liniowej rozszerzalności termicznej wstęgi inwarowej wszystkich typów precyzyjnych łąt geodezyjnych

Wykonywane jest w komorze termicznej Geodezyjnego Laboratorium Metrologicznego Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH (rys. 1) w płaszczyźnie poziomej (podobnie jak w Geodezyjnym Laboratorium Metrologicznym Uniwersytetu Technicznego w Monachium), gdyż takie ułożenie łaty gwarantuje minimalny gradient temperatur na całej jej długości. Wyznaczanie współczynnika liniowej rozszerzalności termicznej łąt polega na wyznaczaniu zmian długości odcinka łaty (zamarkowanego na jej wstędze inwarowej) na podstawie wykonanych równocześnie odczytów na podziałkach mikroskopów spiralnych, których osie pionowe tworzą stałą bazę pomiarową, oraz na podstawie rejestrowanych zmian temperatury za pomocą czujników termicznych.



Rys. 1. Komora techniczna GLM WGGiŚ AGH

3. Kalibracja łąt kodowych na interferencyjnym komparatorze pionowym i poziomym

Kalibracja łąty polega na wyznaczeniu miejsca zera i skali podziału łąty. Oprogramowanie sterujące interferometrem firmy Hewlett-Packard, wykorzystywane przy kalibracji łąty, wymaga wprowadzenia wyznaczonej wcześniej wielkości współczynnika liniowej rozszerzalności termicznej wstęgi inwarowej.

Warto w tym miejscu podkreślić zasadnicze różnice między łątami klasycznymi (z podziałem metrycznym) a łątami kodowymi, które mają wpływ na sposób kalibracji. W łątach klasycznych podział naniesiony jest na wstęgę inwarową z założenia w równych interwałach (najczęściej 5 lub 10 mm). Znane są więc teoretyczne położenia wszystkich kresek podziału, a także odległość pierwszej kreski podziału od stopki łąty. Kalibracji podlega zatem na wyznaczeniu interferometrem dla wybranych kresek podziału odchyłek r_i od wartości nominalnych. W celu optymalizacji procesu kalibracji w GLM AGH obserwowane są kreski podziału zasadniczego i pomocniczego położone w odstępach 50 mm. Na podstawie uzyskanego zbioru odchyłek możliwe jest wyznaczenie średniego metra łąty, bowiem teoretyczna odległość kresek o indeksie i oraz $(i+20)$ wynosi 1 m. Możliwe jest także wyznaczenie skali łąty m bezpośrednio z wartości r_i poprzez rozwiązanie układu równań liniowych

$$r_i + v_i = m \cdot h_i + b \quad (1)$$

gdzie:

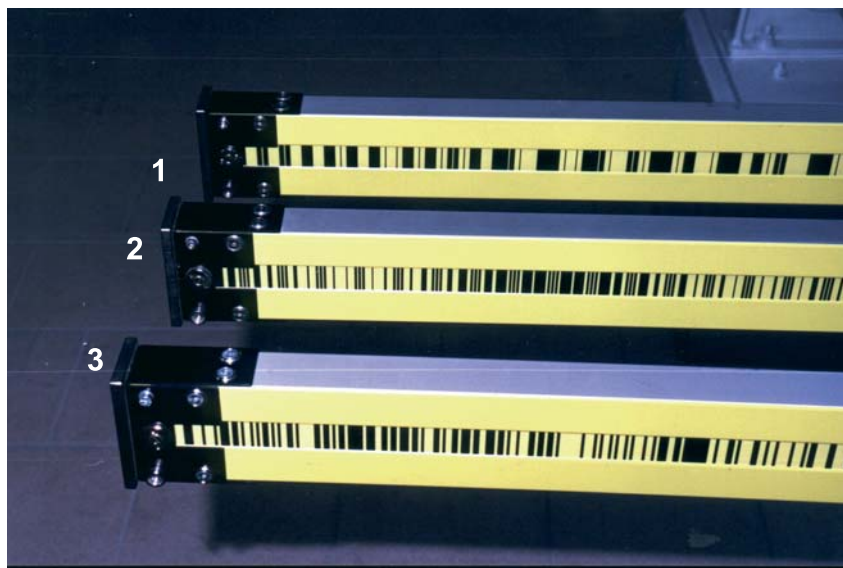
- r_i – pomierzone interferometrem odchyłki położenia kresek od wartości nominalnych,
- v_i – błędy losowe obserwacji r_i ,
- m – skala podziału łąty,
- h_i – miary bieżące kresek liczone od kreski zerowej łąty,
- b – wyraz wolny (stała układu, nie ma znaczenia dla szukanej wielkości).

Obecnie na rynku działają trzy firmy produkujące precyzyjne niwelatory cyfrowe – Wild/Leica, Zeiss (Trimble) i Topcon. Każda firma opracowała inny typ podziału kodowego (rys. 2) i sposób obliczania przez oprogramowanie niwelatora odczytu z łąty [3].

W łątach i niwelatorach firmy Leica zastosowano pseudostochastyczny kod binarny, który składa się z elementów o szerokości równej wielokrotności modułu podstawowego 2,025 mm. Firma Zeiss wykorzystuje kod bifazowy, który oparty jest na kombinacji elementów podstawowych o szerokości 20 mm. Topcon posługuje się kodem składającym się z trzech sekwencyjnie powtarzających się elementów, które można oznaczyć jako R-A-B. Element R, który jest odniesieniem dla zmiennych elementów A i B, stanowią trzy czarne paski o szerokości 2mm przedzielone białymi o szerokości 3 mm. Zachowana jest stała odległość pomiędzy środkami elementów R, A i B wynosząca 10 mm. łąty do niwelacji precyzyjnej dla tych trzech firm produkuje niemiecka firma Nedo. Mają one taką samą budowę i wykonane są z tych samych materiałów, różnią się jedynie typem kodu naniesionego na taśmę inwarową (rys. 3). Dla uproszczenia łąty produkowane przez firmę Nedo z podziałem Leica będą nazywane „łątami Leica” itd.



Rys. 2. Kody stosowane w różnych typach instrumentów: a) Wild/Leica; b) Zeiss (Trimble); c) Topcon
Źródło: [3]



Rys. 3. Łaty kodowe: 1 - Zeiss, 2 - Topcon, 3 - Leica

Do przeprowadzenia kalibracji niezbędna jest znajomość teoretycznego położenia krawędzi kreski kodu, by móc wyznaczyć odchyłki od tej wielkości. W wypadku łąt kodowych znamy jedynie interwały podstawowe tworzące kod i ogólną zasadę jego konstrukcji. Konieczne jest zatem ustalenie dla każdego typu kodu „kreski zerowej”, czyli pierwszej obserwowanej krawędzi kodu, a także „interwału pomiarowego”, czyli odległości między kolejnymi obserwowanymi krawędziami kodu. W wypadku łąt Zeiss odległość kreski zerowej od stopki łąty wynosi teoretycznie 40 mm, a interwał pomiarowy równy jest 20 mm. Podczas kalibracji łąt Topcon obserwowane są środkowe paski kodu R (czyli interwał pomiarowy wynosi 30 mm), a pierwszy widoczny pasek znajduje się 60 mm od stopki łąty. W wypadku łąt Leica interwał pomiarowy zmienia się w zakresie 20÷30 mm (nie można ustalić jednego interwału dla całej łąty ze względu na pseudostochastyczny charakter kodu).

Wyznaczanie miejsca zera łąty polega na określeniu odległości d kreski zerowej łąty od punktu S , tj. punktu przebicia płaszczyzny stopki łąty przez oś wstęgi inwarowej. Pomiar mający na celu określenie miejsca zera łąty wykonywane są w GLM WGGiŚ AGH na komparatorze pionowym z wykorzystaniem interferometru laserowego. Pomiar odległości od punktu S do kreski zerowej wykonywany jest w czterech seriach (po dwa nacelowania w każdej serii). Różnica między odległością d teoretyczną a obliczoną z pomiarów jest błędem miejsca zera łąty. Wielkość ta wyznaczana jest z niepewnością $\pm 10 \mu\text{m}$, tj. trzykrotnie większą niż niepewność wyznaczenia odchyłek dla poszczególnych krawędzi kodu. Powodem jest utrudniona identyfikacja styku powierzchni kulistej reperu ze stopką łąty, wykonywana przez obserwatora za pomocą układu obserwacyjnego komparatora. Zdaniem autorów, dokładność wyznaczenia miejsca zera nie zależy od pozycji łąty, co wynika z niewielkiej długości mierzonego odcinka (40÷60 mm). Wyniki wyznaczenia miejsca zera podziału łąt kodowych Zeiss i Leica przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki wyznaczenia miejsca zera łąty wraz z błędami

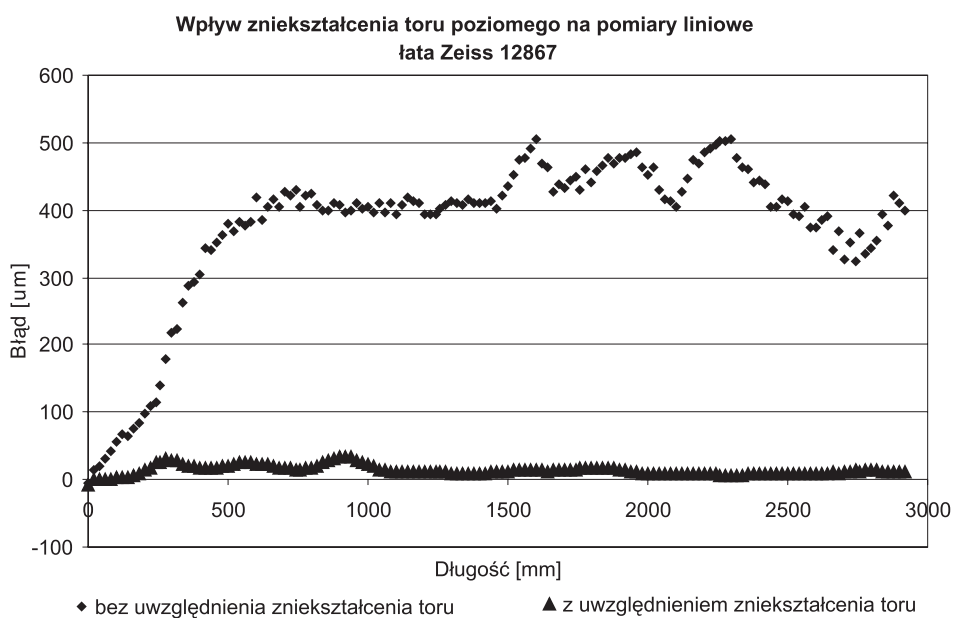
Typ łąty	Numer łąty	d [mm]	m_d [μm]
Zeiss	12858	40,078	6,0
	12867	39,972	6,1
Leica	27114	42,686	10,6
	27119	42,666	10,0

Wyznaczenie skali podziału łąty zostało poprzedzone badaniem odkształceń torów komparatora pionowego (rys. 4) i poziomego, po których przemieszczany był wózek z zamocowanym retroreflektorem interferometru i lunetką Abbego, umożliwiającą precyzyjne celowanie na krawędzie interwałów pomiarowych. Wpływ deformacji toru był następnie uwzględniany w procesie obliczeniowym odchyłek od interwału pomiarowego i skali podziału łąty, co zostało zaprezentowane na rysunkach 5 i 6.

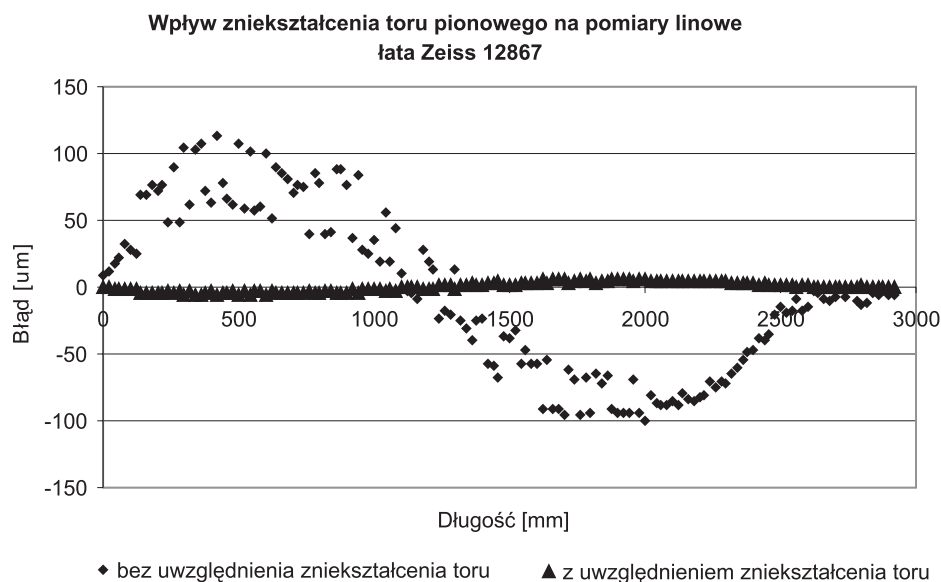
Obserwacje na obu komparatorach wykonano dla czterech łąt: kompletu łąt Zeiss o numerach fabrycznych 12858 i 12867 oraz kompletu łąt Leica o numerach fabrycznych 27114 i 27119. Pomiaru na łątach wykonano dla każdej widocznej krawędzi interwału pomiarowego (łąty Zeiss – co 20 mm, łąty Leica – co 20,025 mm). W czasie pomiarów liniowych rejestrowana była temperatura łąty (za pomocą czujników Hewlett-Packard) w trzech punktach, tj. na stopce łąty, na środku wstęgi inwarowej oraz na jej końcu.



Rys. 4. Układ obserwacyjny komparatora pionowego GLM WGGiŚ AGH



Rys. 5. Poprawki interwałów pomiarowych przed uwzględnieniem i po uwzględnieniu zniekształcenia toru poziomego



Rys. 6. Poprawki interwałów pomiarowych przed uwzględnieniem i po uwzględnieniu zniekształcenia toru pionowego

Za pomocą czujnika HP, rejestrującego temperaturę otoczenia łąty, wilgotność i ciśnienie, wyznaczone były również parametry atmosferyczne. Wielkości te były automatycznie uwzględniane przy wyznaczaniu odchyłek interwałów pomiarowych kalibrowanej łąty. Równomierny rozkład temperatur wzdłuż łąty zapewniały pracujące na trzech poziomach wentylatory.

Każda krawędź interwału pomiarowego kalibrowanej łąty obserwowana była w dwóch seriach: pierwsza przy ruchu wózka od stopki do końca łąty, druga w kierunku przeciwnym. Każda seria obejmowała dwa niezależne odczyty. Dla każdej łąty wyznaczono dwa zbiory odchyłek krawędzi interwałów pomiarowych r_i od wartości nominalnych: jeden na podstawie obserwacji na komparatorze pionowym, drugi na podstawie obserwacji na komparatorze poziomym. Na podstawie tych zbiorów dla każdej łąty wyznaczono dwukrotnie skalę podziału łąty m (z układu równań (1)) oraz błąd średni tej wielkości, a także wartości średnie i maksymalne odchyłek r_i . Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie wyników wyznaczenia skali podziału badanych łąt i odchyłek krawędzi interwału pomiarowego od wartości nominalnych

Badane parametry	Zeiss		Leica	
	12858	12867	27114	27119
Skala podziału łąty				
Komp. poziomy	0,999995 ±0,000005	0,999996 ±0,000005	0,999996 ±0,000012	0,999994 ±0,000011
Komp. pionowy	1,000004 ±0,000012	1,000004 ±0,000003	1,000001 ±0,000006	0,999996 ±0,000012

Tabela 2 cd.

Przeciętne wartości odchyłek r_i				
Komp. poziomy	28,9 μm	23,0 μm	11,8 μm	8,5 μm
Komp. pionowy	2,9 μm	2,9 μm	37,3 μm	24,3 μm
Maksymalne wartości odchyłek r_i				
Komp. poziomy	+51 μm	+44 μm	+25 μm	-25 μm
Komp. pionowy	-6 μm	-6 μm	+83 μm	+70 μm
Maksymalne różnice poprawek r_i wyznaczonych na komparatorze pionowym i poziomym				
	55 μm	48 μm	+68 μm	+53 μm
Przeciętne różnice poprawek r_i wyznaczonych na komparatorze pionowym i poziomym				
	28,9 μm	22,7 μm	25,8 μm	30,3 μm
Błędy średnie szacowania odczytów na podziałach łat				
Komp. poziomy	$\pm 8,5 \mu\text{m}$	$\pm 11,2 \mu\text{m}$	$\pm 8,9 \mu\text{m}$	$\pm 8,1 \text{ mm}$
Komp. pionowy	$\pm 4,4 \mu\text{m}$	$\pm 4,6 \mu\text{m}$	$\pm 2,2 \mu\text{m}$	$\pm 4,4 \mu\text{m}$

4. Wnioski

1. W odniesieniu do łat kodowych nie znajduje uzasadnienia posługiwanie się definicją „metra średniego”, gdyż w wypadku łat Leica i Topcon nie można wyznaczyć odcinków o metrowej długości, które podlegałyby kalibracji. Jest to jedynie możliwe w wypadku łat Zeiss. Rolę „metra średniego” dla łat kodowych (podobnie jak i w wypadku klasycznych) spełnia skala podziału łaty wyznaczana na podstawie odchyłek krawędzi interwałów pomiarowych od wartości nominalnych.
2. Różnice skal podziałów badanych łat, wyznaczonych na podstawie obserwacji na komparatorze poziomym i pionowym, są mniejsze od błędu różnic, z wyjątkiem łaty 12867.
3. Skala podziału łaty wyznaczona dla każdej łaty na komparatorze pionowym jest większa od skali wyznaczonej na komparatorze poziomym, co jest spowodowane odkształceniem łaty podpartej w punktach Bessela w czasie kalibracji w pozycji poziomej.
4. Skala podziału łaty, zdaniem autorów, jest mało czułym parametrem do oceny metrycznej łaty, gdyż jako parametr globalny nie uwzględnia lokalnych zniekształceń podziału.
5. Miarodajną oceną klasy dokładnościowej łaty są, zdaniem autorów, dwie wielkości, tj. przeciętna i maksymalna wartość odchyłek krawędzi interwałów metrycznych r_i .

W wyniku prowadzonych badań stwierdzono, że w wypadku łąt Zeiss maksymalne wartości odchyłek r_i wyznaczone na komparatorze pionowym były znacznie mniejsze od wyznaczonych na komparatorze poziomym, natomiast jeśli chodzi o łątę Leica, wniosek jest odwrotny. Zakres odczytywanego przez niwelator cyfrowy podziału, na podstawie którego interpolowany jest odczyt z łąty, zależy od typu niwelatora. W wypadku instrumentów firmy Leica i Topcon długość obserwowanego odcinka łąty zależy od odległości łąty od instrumentu i wynika z kąta widzenia niwelatora (odpowiednio 2° i $1^\circ 20'$). Niwelatory Zeiss/Trimble analizują odtworzony na linii CCD odcinek łąty w zakresie ± 15 cm po obu stronach linii celowej bez względu na odległość łąty od instrumentu. Z przeprowadzonych przez autorów analiz wynika, że jeżeli błędy skumulują się na obserwowanym przez niwelator odcinku łąty, wówczas odczyt będzie obciążony dużym błędem liniowym, którego nie zminimalizuje uwzględnienie skali podziału łąty.

6. Przeciętna wartość poprawek r_i wyznaczonych na komparatorze poziomym i pionowym różni się w zakresie od 22,7 mm do 30,3 mm. Dla porównania należy zaznaczyć, że łąta jest dopuszczana do niwelacji sieci podstawowej I klasy, jeżeli średni błąd naniesienia elementarnej działki na łacie nie przekracza 30 mm. W tym aspekcie, wystąpienie tak dużych różnic wyznaczonych poprawek położenia krawędzi kodu łąty od wartości nominalnych na komparatorze poziomym i pionowym wyklucza możliwość kalibracji łąty w pozycji poziomej.

Literatura

- [1] Fischer T., Fischer W.: *Manufacturing of High Precision Leveling Rods*. [w:] Lilje M. (ed.), *The Importance of Heights*, Gävle, FIG 1999
- [2] Foppe K., Wasmeier P., Wunderlich Th.: *Erfahrungen aus nahezu 25 Jahren Nivelierlattenprüfungen an der TUM*. AVN Allgemeine Vermessungs Nachrichten, 6, 2005, 213–220
- [3] Ingensand H.: *The Evolution of Digital Levelling Techniques – Limitations and New Solution*. [w:] Lilje M. (ed.), *The Importance of Heights*, Gävle, FIG 1999
- [4] Instrukcja techniczna G-2. *Wysokościowa osnowa geodezyjna*. Warszawa, Główny Urząd Geodezji i Karografii 1986
- [5] Jasnorzewski J.: *Metrologia długości*. Warszawa, PPWK 1959
- [6] Margański S.: *Pomiary niwelacyjne w podstawowych sieciach wysokościowych*. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej 1989
- [7] Polska Norma BN-78/8770-07