

# Spis treści

1.	Wstęp .....	9
1.1.	Przedmiot i zakres pracy .....	9
1.2.	Terminologia stosowana w monografii .....	12
1.3.	Tezy naukowe .....	13
2.	Analiza czynników wpływających na dokładność niwelacji precyzyjnej .....	14
2.1.	Wprowadzenie .....	14
2.2.	Wpływ sprzętu do niwelacji na jej dokładność .....	15
2.2.1.	Niwelatory .....	15
2.2.2.	Łaty do niwelacji precyzyjnej .....	17
2.2.2.1.	Błędy urządzeń do pionowania łąty .....	18
2.2.2.2.	Błąd nieprostoliniowości korpusu łąty .....	19
2.2.2.3.	Błędy spowodowane zmianą siły naciągu taśmy inwarowej łąty .....	20
2.2.2.4.	Błędy powodowane wpływami termicznymi .....	20
2.2.2.5.	Błędy stopki łąty .....	21
2.2.2.6.	Błędy podziału łąty .....	22
2.3.	Wpływ czynników zewnętrznych .....	23
2.4.	Wpływ Księżyca i Słońca na dobowe zmiany kierunku linii pionu .....	24
2.5.	Wpływ stosowanego systemu wysokości .....	24
2.6.	Podsumowanie .....	25
3.	Analiza metod wyznaczania współczynnika liniowej rozszerzalności termicznej (WLRT) oraz kalibracji łąt .....	26
3.1.	Wprowadzenie .....	26
3.2.	Rys historyczny technik wzorcowania .....	26
3.3.	Rys historyczny technik wyznaczania WLRT .....	30
3.4.	Laboratoria wykonujące kalibrację łąt .....	31
3.4.1.	Universität des Bundeswehr München (UniBwM) .....	31
3.4.2.	Technische Universität München (TUM) .....	33
3.4.3.	Technische Universität Graz (TUG) .....	35
3.4.4.	Finnish Geodetic Institute (FGI) .....	38
3.4.5.	Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen (LVerMA NRW) ....	40

3.4.6.	Instytut Geodezji Wyższej i Astronomii Geodezyjnej Politechniki Warszawskiej (IGWiAG) .....	41
3.4.7.	Instytut Geodezji i Kartografii w Warszawie (IGiK) .....	42
3.5.	Wzorcowanie łąt a kalibracja systemu niwelator-łąta .....	45
4.	Wyznaczanie wartości współczynnika liniowej rozszerzalności termicznej wstęgi inwarowej łąty .....	46
4.1.	Wprowadzenie .....	46
4.2.	Właściwości termiczne inwaru .....	47
4.3.	Metody wyznaczania WLRT .....	50
4.4.	Stanowisko do wyznaczania WLRT wstęgi inwarowej łąty w GLM AGH .....	51
4.4.1.	Wprowadzenie .....	51
4.4.2.	Założenia projektowe stanowiska .....	52
4.4.2.1.	Koncepcja metody wyznaczania zmian długości wstęgi inwarowej łąty .....	52
4.4.2.2.	Sposób określania zmian temperatur .....	54
4.4.2.3.	Ułożenie łąty w czasie wyznaczania WLRT .....	55
4.4.2.4.	Izolacyjność układu .....	56
4.4.2.5.	Automatyzacja procesu wyznaczania WLRT .....	56
4.4.2.6.	Wstępna analiza dokładności wyznaczenia WLRT .....	56
4.4.3.	Opis stanowiska .....	57
4.4.3.1.	Wprowadzenie .....	57
4.4.3.2.	Układ regulacji temperatury .....	58
4.4.3.3.	Układ kontroli temperatury .....	59
4.4.3.4.	Układ odczytowy .....	60
4.4.3.5.	Układ rejestracji danych .....	60
4.4.4.	Analiza rozwiązań zmodernizowanej komory .....	60
4.4.4.1.	Wzorcownie czujników temperatury .....	60
4.4.4.2.	Zakres temperatur osiąganych w komorze .....	63
4.4.4.3.	Badanie izolacyjności układu .....	64
4.5.	Technologia prowadzenia pomiarów związanych z wyznaczeniem WLRT .....	65
4.5.1.	Ustalenie interwału zmian temperatury w komorze termicznej ...	65
4.5.2.	Realizacja pomiarów .....	65
4.6.	Procedura obliczeniowa wyznaczania WLRT .....	68
4.6.1.	Model funkcjonalny .....	68
4.6.2.	Ocena dokładności modelu .....	69
4.6.3.	Przykład liczbowy .....	73
4.6.4.	Efekt końcowy badań .....	74
4.7.	Badania szczegółowe .....	76
4.7.1.	Anomalie termiczne inwaru .....	76
4.7.2.	Zjawisko histerezy temperaturowej podczas wyznaczania WLRT .....	80
4.7.3.	Zjawisko nieliniowego charakteru zmian długości .....	82

4.7.3.1.	Wpływ nieliniowego charakteru zmian długości na postać poprawki termicznej .....	83
4.7.3.2.	Aproksymacja trzema modelami – analiza wyników .....	84
4.7.4.	Zmiany WLRT łąt z różnych okresów .....	85
4.7.5.	Przypadki nietypowe .....	91
4.7.6.	Porównanie wyników badań w GLM AGH i FGI .....	92
5.	Wzorcowanie łąt w Geodezyjnym Laboratorium Metrologicznym Akademii Górniczo-Hutniczej z wykorzystaniem interferometru laserowego .....	95
5.1.	Ogólna zasada pomiarów interferencyjnych .....	95
5.2.	Stanowisko do kalibracji łąt – komparator pionowy .....	97
5.2.1.	Wprowadzenie .....	97
5.2.2.	Prototypowa konstrukcja komparatora pionowego .....	97
5.2.3.	Komparator pionowy po modernizacji .....	99
5.2.3.1.	Uwagi wstępne .....	99
5.2.3.2.	Modernizacja konstrukcji komparatora pionowego .....	99
5.2.3.3.	Modernizacja układu pomiarowego – pomiar dwuosiowy .....	101
5.2.3.4.	Modernizacja układu pomiarowego – zastosowanie kamery CCD .....	105
5.3.	Procedura wzorcowania łąt niwelacyjnych na komparatorze pionowym ...	106
5.3.1.	Uwagi wstępne .....	106
5.3.2.	Ocena stanu łąty .....	106
5.3.3.	Określenie siły naciągu taśmy inwarowej .....	108
5.3.4.	Badanie deformacji korpusu łąty .....	108
5.3.5.	Badanie płaszczyznowości i prostopadłości stopki łąty do osi łąty .....	109
5.3.6.	Określenie zera podziału łąty .....	110
5.3.7.	Wyznaczenie skali i błędów podziału łąty .....	111
5.3.7.1.	Rodzaje podziałów precyzyjnych łąt niwelacyjnych .....	111
5.3.7.2.	Procedura wyznaczania poprawek i współczynnika skali podziału łąt .....	116
5.3.7.3.	Modyfikacja algorytmu wyznaczenia poprawki współczynnika skali łąty .....	118
5.3.7.4.	Świadectwo kalibracji .....	121
5.4.	Analiza wyników badań .....	121
5.4.1.	Materiał badawczy .....	121
5.4.2.	Porównanie wyników kalibracji różnych typów łąt .....	121
5.4.2.1.	Syntetyczne wyniki porównania .....	121
5.4.2.2.	Porównanie wartości zera podziału łąt .....	123
5.4.2.3.	Porównanie wartości skali łąt .....	124
5.4.2.4.	Porównanie wartości błędów podziału .....	127
5.4.2.5.	Porównanie wyników kalibracji w GLM AGH i Finlandzkim Instytucie Geodezji (FGI) .....	128
5.4.2.6.	Porównanie kalibracji wykonanych w różnych okresach ....	131

5.4.3.	Nieliniowe zmiany podziału .....	137
5.4.3.1.	Deformacje podziału wynikające z niewłaściwego użytkowania łat .....	137
5.4.3.2.	Wielomianowe zmiany podziału łaty .....	140
5.5.	Poprawka kalibracyjna do wyników niwelacji .....	141
5.5.1.	Dotychczasowe i proponowane sposoby uwzględniania poprawki kalibracyjnej .....	141
5.5.2.	Wpływ sposobu obliczenia poprawki kalibracyjnej na wyznaczone przewyższenie – weryfikacja teoretyczna .....	143
5.5.3.	Wpływ sposobu obliczenia poprawki kalibracyjnej na wyznaczone przewyższenie – analiza na danych z pomiarów terenowych .....	149
5.5.4.	Uwagi dotyczące stosowania różnych metod obliczania poprawki kalibracyjnej .....	156
6.	Wnioski końcowe .....	158
	Bibliografia .....	160