

Władysław Koc
Cezary Specht
Piotr Chrostowski

Projektowanie i eksploatacja dróg szynowych z wykorzystaniem mobilnych pomiarów satelitarnych

Gdańsk 2021

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Dariusz Mikielewicz

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

Michał Szydłowski

RECENZENCI

Stanisław Oszczak

Mariusz Wąż

REDAKCJA JĘZYKOWA

Agnieszka Frankiewicz

SKŁAD

Katarzyna Olszonowicz

Projekt okładki na podstawie fot. Jacka Szmaglińskiego

Piotr Chrostowski

AUTORZY ROZDZIAŁÓW

Władysław Koc – 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11

Cezary Specht – 1, 2, 3, 4, 11

Piotr Chrostowski – 3, 4, 5, 9, 10, 11

Wydanie I – 2018

Wydano za zgodą

Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem

<https://www.sklep.pg.edu.pl>

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy.

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2021

ISBN 978-83-7348-735-2

Spis treści

WPROWADZENIE	7
1. AKTYWNE SIECI GEODEZYJNE GNSS	9
1.1. Geneza	9
1.2. Architektura i serwisy wybranych aktywnych sieci geodezyjnych	10
1.2.1. Amerykańska sieć CORS	10
1.2.2. Szwedzka sieć SWEPOS	11
1.2.3. Brytyjska sieć OS-AGN	13
1.2.4. Niemiecka sieć SAPOS	14
1.2.5. Polska sieć ASG-EUPOS	15
1.2.6. Sieć Leica SmartNet	18
1.2.7. Sieć TPI NETpro	19
1.2.8. Sieć VRSnet.pl	21
1.2.9. Porównanie wybranych aktywnych sieci geodezyjnych	23
1.3. Metody modelowania korekt PRC	26
1.3.1. Metoda VRS	26
1.3.2. Metoda MAC	27
1.3.3. Metoda FKP	28
2. MODELOWANIE DOKŁADNOŚCI OKREŚLENIA POZYCJI W POMIARACH GNSS ..	31
2.1. Niepewność pomiaru	31
2.2. Pojęcie dokładności współrzędnych w geodezji i nawigacji	33
2.2.1. Model wyznaczenia współrzędnych pozycji	36
2.2.2. Miary dokładności wyznaczenia współrzędnych pozycji – 2D	37
2.2.3. Miary dokładności wyznaczenia współrzędnych pozycji – 3D	47
2.3. Dostępność i niezawodność systemów nawigacyjnych – model klasyczny	49
2.3.1. Ewolucja terminologiczna	49
2.3.2. Kategorie dostępności	52
2.3.3. Wskaźniki oceny dostępności i niezawodności	53
2.3.4. Modelowanie matematyczne dostępności i niezawodności	56
2.4. Wiarygodność systemów nawigacyjnych – model klasyczny	66
2.5. Interpretacja nawigacyjna miar opisujących przestrzeń wektora stanu serwisów nawigacyjnych ASG-EUPOS	67
2.5.1. Dokładność określenia pozycji – dwustanowy model niezawodnościowy	67
2.5.2. Dostępność określonej wartości błędu wyznaczeń pozycji	71
2.5.3. Niezawodność określonej wartości błędu wyznaczeń pozycji	80
2.5.4. Ciągłość określonej wartości błędu wyznaczeń pozycji	82
2.5.5. Ocena charakterystyk niezawodnościowych na podstawie wartości granicznych kryteriów	83
3. MOBILNE POMIARY SATELITARNE DRÓG SZYNOWYCH	86
3.1. Opis przeprowadzonych pomiarów	86
3.2. Analiza dokładności wyznaczenia współrzędnych	89
3.3. Ocena dokładności w odniesieniu do pomierzonego układu geometrycznego	94
3.3.1. Przyjęta metodyka analizy	94
3.3.2. Filtrowanie sygnału	98
3.3.3. Ocena dokładności poziomej wybranej kampanii pomiarowej	99

3.3.4. Ocena dokładności poziomej pomiarów przeprowadzonych w latach 2009–2015 ...	103
3.3.5. Ocena dokładności pionowej wybranej kampanii pomiarowej	105
3.3.6. Ocena dokładności pionowej pomiarów przeprowadzonych w latach 2009–2015 ...	106
3.3.7. Zestawienie wyników analizy	108
4. MOŻLIWOŚCI APLIKACYJNE	110
4.1. Wykorzystanie wyników pomiarów do wizualizacji położenia toru	110
4.2. Ocena odcinków prostych toru	111
4.3. Tworzenie poligonu kierunków głównych trasy	114
4.4. Ocena odcinków trasy leżących w łuku	115
4.5. Nowa metodyka projektowania	117
4.6. Uniwersalna metoda regulacji osi toru	119
5. ANALIZA RÓWNAŃ PARAMETRYCZNYCH KRZYWYCH PRZEJŚCIOWYCH DLA DRÓG KOLEJOWYCH	121
5.1. Ogólna charakterystyka krzywych przejściowych	121
5.2. Metodyka wyznaczania równań krzywych przejściowych	122
5.3. Analiza wybranych postaci krzywych przejściowych	123
5.3.1. Klotoida	123
5.3.2. Parabola czwartego stopnia	124
5.3.3. Krzywa Blossa	127
5.3.4. Cosinusoida	127
5.3.5. Sinusoida	129
5.4. Analiza krzywych przejścia	130
5.4.1. Krzywa przejścia o krzywiznie liniowej	130
5.4.2. Krzywa przejścia o krzywiznie wielomianowej	131
5.4.3. Krzywa przejścia o krzywiznie trygonometrycznej klasy C^1	133
5.4.4. Krzywa przejścia o krzywiznie trygonometrycznej klasy C^2	135
5.5. Podsumowanie analizy krzywych przejściowych	136
6. ANALITYCZNA METODA PROJEKTOWANIA ŁUKÓW KOŁOWYCH	138
6.1. Podstawowe założenia	138
6.2. Projektowanie symetrycznego układu geometrycznego	142
6.2.1. Założenia ogólne	142
6.2.2. Lokalny układ współrzędnych	143
6.2.3. Określenie rzędnych krzywej przejściowej w układzie współrzędnych (x_k, y_k)	144
6.2.4. Transformacja krzywej przejściowej do lokalnego układu współrzędnych	145
6.2.5. Określenie rzędnych łuku kołowego	146
6.2.6. Uzupełnienie rzędnych dla drugiej części projektowanego rejonu trasy	147
6.3. Projektowanie niesymetrycznego układu geometrycznego	148
6.3.1. Założenia ogólne	148
6.3.2. Wyznaczenie współrzędnych krzywej przejściowej KP1	149
6.3.3. Wyznaczenie współrzędnych krzywej przejściowej KP2	150
6.3.4. Określenie rzędnych łuku kołowego	150
6.3.5. Skompletowanie rzędnych całości układu geometrycznego	152
6.3.6. Przeniesienie rozwiązania do układu PUWG-2000	152
6.3.7. Rozwiązanie dla przypadku symetrycznego	153
6.3.8. Przykłady obliczeniowe	153
7. ANALITYCZNA METODA PROJEKTOWANIA ŁUKÓW KOSZOWYCH	158
7.1. Podstawowe założenia	158
7.2. Wyznaczenie współrzędnych pierwszej krzywej przejściowej	159
7.3. Wyznaczenie współrzędnych pierwszego łuku kołowego	160
7.4. Wyznaczenie współrzędnych drugiej krzywej przejściowej	161
7.5. Wyznaczenie współrzędnych drugiego łuku kołowego	163

7.6. Wyznaczenie współrzędnych trzeciej krzywej przejściowej	164
7.7. Określenie współrzędnych pozostałych punktów charakterystycznych	165
7.8. Wybór wariantu projektowego	166
7.9. Przykład obliczeniowy	167
8. ANALITYCZNA METODA PROJEKTOWANIA ŁUKÓW ODWROTNYCH	171
8.1. Założenia ogólne	171
8.2. Dobór parametrów projektowanego układu geometrycznego	172
8.3. Wyznaczenie współrzędnych pierwszej krzywej przejściowej	173
8.4. Wyznaczenie współrzędnych pierwszego łuku kołowego	174
8.5. Wyznaczenie współrzędnych drugiej krzywej przejściowej	175
8.6. Wyznaczenie współrzędnych trzeciej krzywej przejściowej	176
8.7. Wyznaczenie współrzędnych drugiego łuku kołowego	177
8.8. Wyznaczenie właściwego położenia początku lokalnego układu współrzędnych	179
8.9. Przykłady obliczeniowe	180
9. WSPOMAGANIE KOMPUTEROWE W PROJEKTOWANIU UKŁADU GEOMETRYCZNEGO Z WYKORZYSTANIEM POMIARÓW SATELITARNYCH	183
9.1. Metoda mobilnych pomiarów satelitarnych a techniki CAD	184
9.2. Algorytmy i programy wspomagające projektowanie i ocenę układów geometrycznych linii kolejowej w planie sytuacyjnym	189
9.2.1. Wizualizacja trasy	193
9.2.2. Poligon trasy – analiza odcinków prostych	197
9.2.3. Ocena rejonu zmiany kierunków głównych trasy	206
10. OKREŚLANIE PARAMETRÓW POMIARZONEGO UKŁADU GEOMETRYCZNEGO	209
10.1. Założenia do uniwersalnego programu wspomagającego projektowanie osi toru	210
10.2. Analiza przypadków z zastosowaniem algorytmów wspomagających projektowanie i ocenę układów geometrycznych	211
10.2.1. Kierunki główne	211
10.2.2. Rejon zmiany kierunku trasy	214
10.2.3. Łuk koszowy	220
10.2.4. Złożony układ geometryczny	221
11. NOWA METODA REGULACJI OSI TORU	224
11.1. Pojęcie regulacji osi toru	224
11.2. Uwagi na temat metodyki regulacji osi toru	224
11.3. Stosowana metodyka regulacji osi toru	226
11.4. Uniwersalna metoda regulacji osi toru	229
11.4.1. Podstawowe założenia	229
11.4.2. Tworzenie poligonu kierunków głównych trasy	229
11.4.3. Ocena odcinków prostych trasy	231
11.4.4. Projektowanie trasy leżącej w łuku	232
11.4.5. Kryteria optymalizacji	232
11.4.6. Proces optymalizacji wyboru wariantu	233
11.4.7. Podsumowanie	237
ZAKOŃCZENIE	239
BIBLIOGRAFIA	242
Streszczenie w języku polskim	249
Streszczenie w języku angielskim	249

Wprowadzenie

Jednym z istotnych problemów związanych z kształtowaniem układów geometrycznych toru kolejowego jest konieczność operowania w lokalnych układach współrzędnych. Wiąże się to z występującymi na kolei długościami elementów geometrycznych – odcinków prostych i łuków kołowych, które są często tak długie, że wizualna ocena ich kształtu staje się niemożliwa. W tej sytuacji stosowanie metod pomiarowych geodezji tradycyjnej wymaga podziału trasy na mniejsze części, które są rozpatrywane oddzielnie. Staje się to jednak źródłem dodatkowych błędów, a całościowa ocena danego układu jest przez to bardzo utrudniona.

Taki sposób postępowania, głęboko zakorzeniony w tradycji, utrwalił się w powszechnej świadomości i konieczność zmiany istniejącej sytuacji nie wszystkim wydaje się do końca oczywista. Tymczasem wprowadzenie na szeroką skalę pomiarów satelitarnych [91] do pozycjonowania punktów trasy komunikacyjnej powoduje konieczność radykalnej zmiany podejścia do omawianego zagadnienia. Dotyczy to również odpowiedniego przygotowania danych projektowych. Układ geometryczny należy projektować w lokalnym układzie współrzędnych prostokątnych, aby następnie transponować go do układu globalnego. Z tego względu geodezyjne pomiary satelitarne umożliwiają zarówno inwentaryzację stanu istniejącego, jak i tyczenie nowo projektowanej lub modernizowanej trasy w terenie w jednolitym układzie współrzędnych.

Jedną z podstawowych czynności technologiczno-utrzymaniowych jest regulacja osi toru kolejowego. Konieczność jej wykonywania wynika z deformowania się toru pod wpływem oddziaływań powodowanych ruchem taboru kolejowego. Roboty naprawcze polegają na nasunięciu odkształconego toru na projektowaną oś. W celu określenia wartości i kierunku nasunięcia istniejącego (odkształconego) toru wykorzystuje się odpowiednią metodykę pomiarową i dostosowane do tego metody projektowania. Przez długie lata dane do zaprojektowania nowej osi toru były uzyskiwane na podstawie określenia kształtu istniejącego poprzez pomiar strzałek od cięciwy. Zatem projektowanie, nawet z wykorzystaniem techniki numerycznej, przy użyciu komputerów wyposażonych w odpowiednie oprogramowanie, opierało się na danych zebranych z terenu za pomocą mało dokładnej metody. Wykorzystanie pomiarów satelitarnych sprawia, że taki sposób postępowania traci całkowicie swoją rację bytu.

Globalny system pozycjonowania (ang. *Global Positioning System*, GPS) [7, 81, 89, 91] pozwala na wyznaczanie współrzędnych punktów w jednolitym, trójwymiarowym systemie odniesienia WGS-84, którego początek znajduje się w centrum masy Ziemi. Wyznaczone na drodze pomiarów GPS współrzędne elipsoidalne są przekształcane poprzez odwzorowanie Gaussa-Krügera w celu uzyskania współrzędnych płaskich prostokątnych [91]. Współrzędne te tworzą w Polsce tzw. Państwowy Układ Współrzędnych Geodezyjnych 2000 (PUWG-2000), stanowiący jeden z elementów państwowego systemu odniesień przestrzennych. Mobilne pomiary satelitarne umożliwiają wyznaczenie współrzędnych istniejącej trasy kolejowej w układzie PUWG-2000 [58, 61]. W takiej sytuacji staje się oczywiste, że w układzie tym powinny być wyznaczane również współrzędne nowo projektowanej osi

toru, służące do wytyczenia trasy w terenie. Wymaga to zmiany dotychczasowej metodyki projektowania.

Dlatego też już teraz należy podejmować działania zmierzające do stworzenia podstaw wdrożeniowych nowego systemu pomiarowego dla kolei. Niniejsza praca dotyczy właśnie tej kwestii i przedstawia ogólną charakterystykę pomiarów satelitarnych, opisuje zastosowaną technikę tych pomiarów w wersji mobilnej oraz określa możliwości aplikacyjne omawianej metody. Następnie prezentuje algorytmy analitycznej metody projektowania, zainspirowanej przez pomiary satelitarne, jak również system wspomaganie komputerowe umożliwiający wykorzystanie ogromnej liczby uzyskanych z pomiarów danych. W dalszej części opracowania pokazano przykłady określania parametrów geometrycznych istniejącej trasy oraz opracowaną nową metodę regulacji osi toru.

Inicjatorem prowadzonych badań, rozpoczętych na początku 2009 roku, była Politechnika Gdańska – Katedra Inżynierii Kolejowej (obecnie Transportu Szynowego i Mostów) i Zakład Geodezji. Techniczne możliwości ich przeprowadzenia stworzył Zakład Linii Kolejowych PKP PLK SA w Gdyni, współuczestnikami badań były zaś: Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni – Instytut Nawigacji i Hydrografii Morskiej oraz firma Leica Geosystems SA (która udostępniła aparaturę pomiarową). W kolejnych latach w pomiarach zaznaczył się istotny merytoryczny udział Akademii Morskiej w Gdyni – Katedry Geodezji i Oceanografii. Obserwowany na przestrzeni blisko 9 lat badań wzrost dokładności pomiarów satelitarnych wskazuje na możliwość znacznego rozszerzenia zakresu stosowalności opracowanej metody w projektowaniu i eksploatacji dróg szynowych.