

Uniwersalna metoda projektowania regulacji osi toru z wykorzystaniem pomiarów satelitarnych i optymalizacji

Władysław KOC¹, Cezary SPECHT², Piotr CHROSTOWSKI³, Katarzyna PALIKOWSKA⁴

Streszczenie

W artykule zwrócono uwagę na ograniczenia stosowanej w Polsce metodyki regulacji osi toru, związane głównie z używaną dokładnością określania istniejącego kształtu toru. Jako rozwiązanie alternatywne wskazano nowatorską technikę mobilnych pomiarów satelitarnych, opracowaną przez interdyscyplinarny zespół naukowy Politechniki Gdańskiej i Akademii Marynarki Wojennej / Akademii Morskiej w Gdyni i stosowaną od 2009 roku. Możliwość wykorzystywania tych pomiarów była inspiracją do opracowania analitycznej metody projektowania układów geometrycznych, a następnie sformułowania założeń dla nowej metody regulacji osi toru. Ustalenie parametrów geometrycznych układu następuje w procesie optymalizacji prowadzonym algorytmem roju cząstek PSO (*Particle Swarm Optimization*) oraz algorytmem genetycznym. Optymalizacja ma charakter wielokryterialny, wymaga więc odpowiedniego doboru wag poszczególnych kryteriów. Podstawowymi stosowanymi kryteriami są: minimalizacja przesunięć poprzecznych toru oraz uzyskanie jak największej prędkości jazdy pociągów po regulacji osi toru.

Słowa kluczowe: układ geometryczny toru, pomiary satelitarne, projektowanie, optymalizacja wyboru wariantu, wspomaganie komputerowe

1. Wprowadzenie

Podczas regulacji osi toru na PKP są wykorzystywane osnowy geodezyjne, składające się z punktów odniesienia wyznaczonych techniką pomiarów stacjonarnych GPS oraz z punktów szczegółowych, których współrzędne są wyznaczone metodami klasycznymi, z wykorzystaniem precyzyjnych tachimetrów elektronicznych. Wyznaczanie współrzędnych prostokątnych osi toru jest wykonywane podczas przejazdu wózka pomiarowego ze stacji pomiarowej ustawionej na wózku. Wykonanie pomiaru polega na śledzeniu lustra umieszczonego na znaku regulacji osi toru. Na dokładność pomiaru, oprócz błędu samego pomiaru tachimetrycznego, ma wpływ błąd określenia współrzędnych osnowy.

W zakresie sposobu projektowania, podstawowym narzędziem jest komercyjny program komputerowy [15], przeznaczony do zastosowań kolejowych. Program jest dostosowany do operowania specyficzną formą reprezentacji kształtu istniejącego toru, jaką jest wykres strzałek poziomych (określany

w programie mianem „wykresu krzywizny”). Służy on do zlokalizowania podstawowych elementów geometrycznych istniejącego układu prostych i łuków kołowych (na podstawie tzw. regresji jednoelementowej) oraz krzywych przejściowych (na podstawie drugiego stopnia regresji). Jest to więc metoda przybliżona.

Przedstawione założenia stosowanej techniki pomiarowej, jak również samego projektowania nie dotyczą techniki mobilnych pomiarów satelitarnych, zastosowanej w Polsce po raz pierwszy w 2009 roku przez interdyscyplinarny zespół naukowy Politechniki Gdańskiej i Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni [8, 14]. Nawiązuje ona do pilotażowych badań amerykańskich [15], a jej istota polega na wykonaniu pomiarów geodezyjnych podczas ruchu platformy pomiarowej z zamontowanymi na niej geodezyjnymi odbiornikami satelitarnymi GNSS (GPS – USA, Glonass – Rosja i Beidou – Chiny), określaniu optymalnego przedziału czasowego wykonywania pomiarów (z uwagi na konstelację satelitów), zastosowaniu naziemnych korekcyjnych

¹ Prof. dr hab. inż.; Politechnika Gdańska, Katedra Transportu Szynowego i Mostów; e-mail: kocwl@pg.gda.pl.

² Prof. dr hab. inż.; Akademia Morska w Gdyni, Katedra Geodezji i Oceanografii.

³ Dr inż.; Politechnika Gdańska, Katedra Transportu Szynowego i Mostów.

⁴ Dr inż.; Politechnika Gdańska, Katedra Transportu Szynowego i Mostów.

sieci satelitarnych (ASG-EUPOS, Leica Smart Net) oraz pomiary w czasie rzeczywistym z częstotliwością 20 Hz. Wyznaczone na drodze pomiarów GPS współrzędne elipsoidalne są przekształcane przez odwzorowanie Gaussa-Krügera w celu uzyskania współrzędnych płaskich prostokątnych [13]. Współrzędne te tworzą w Polsce tzw. układ PL-2000, stanowiący jeden z elementów państwowego systemu odniesień przestrzennych.

Technika mobilnych pomiarów satelitarnych pozwala w sposób precyzyjny (z krokiem 200÷300 mm, w zależności od prędkości przejazdu zestawu pomiarowego) i nieporównywalnie szybszy w stosunku do metody tachimetrycznej (nawet we wspomnianej wcześniej wersji mobilnej) wyznaczać współrzędne istniejącej osi toru. Na ich podstawie można oceniać dany układ geometryczny i modyfikować ukształtowanie torów w sposób racjonalny i zgodny z uniwersalnymi zasadami projektowania. Regulacja osi toru obejmuje trzy podstawowe fazy:

- określenie współrzędnych prostokątnych istniejącej osi toru,
- zaprojektowanie skorygowanych współrzędnych prostokątnych,
- przeniesienie skorygowanych współrzędnych w tor.

Do określenia współrzędnych prostokątnych istniejącej osi toru nadaje się bardzo dobrze technika mobilnych pomiarów satelitarnych, a przeniesienie nowych współrzędnych w tor, też powinno odbywać się z wykorzystaniem techniki satelitarnej. Natomiast druga faza procesu regulacji ma zupełnie inny charakter i jest związana ze specyfiką eksploatacji linii kolejowych.

2. Tworzenie poligonu kierunków głównych trasy

Pomierzona trasa składa się z odcinków prostych, wyznaczających jej główne kierunki oraz łączących je odcinków łukowych. Pierwszym zadaniem projektanta będzie utworzenie poligonu kierunków głównych (w postaci wielokąta otwartego złożonego z przecinających się prostych). Pomierzone współrzędne punktów wykorzystuje się do wyznaczenia, metodą najmniejszych kwadratów, równań poszczególnych prostych w układzie Y, X w postaci $X = A_i + B_i Y$, gdzie $i = 1, 2, \dots, n$, zaś n oznacza występującą liczbę kierunków głównych trasy. Z punktu widzenia poszukiwań rzeczywistego kierunku trasy, kluczową wartość stanowią współczynniki nachylenia $B_i = \tan \varphi$. Mając wyznaczone równania wszystkich prostych w układzie PL-2000, można określić kąty zwrotu oraz współrzędne punktów głównych trasy.

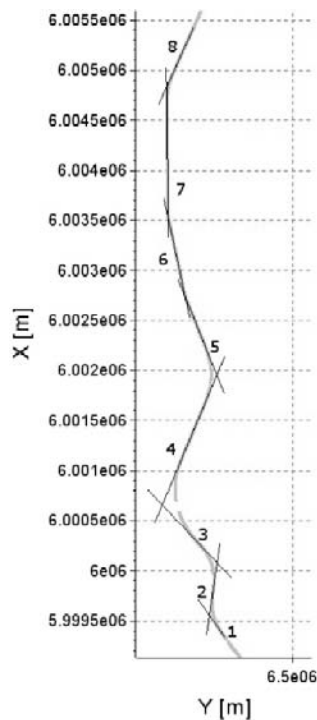
W tabelicy 1 przedstawiono dane liczbowe przykładowego poligonu kierunków głównych trasy. Zawarto w niej parametry wyznaczonych równań liniowych oraz charakterystyczne współrzędne punktów leżących na kierunkach głównych, tj. punktów określających zakres pomiaru przyjęty do analizy prostych ($Y_{\downarrow p}, X_{\downarrow p}$) i ($Y_{\downarrow k}, X_{\downarrow k}$) (p – początek, k – koniec). Obliczane są również współrzędne wierzchołków tworzonego przez te odcinki wieloboku (Y_w, X_w) oraz kąty zwrotu trasy.

Na podstawie przeprowadzonej analizy, zidentyfikowany poligon bądź dowolny jego fragment jest opisany macierzą parametrów równań kierunków głównych trasy KGT oraz tablicą współrzędnych charakterystycznych i kątów zwrotu WSP. Na rysunku 1 pokazano zidentyfikowany poligon kierunków głównych opisany w tabelicy 1.

Tabelica 1

Charakterystyka przykładowego poligonu kierunków głównych trasy

i	B_f	A_f [m]	R^2	Y_p [m]	Y_k [m]	X_p [m]	X_k [m]	Y_w [m]	X_w [m]	φ [st]	α [st]
1	-1,43191	15305802	0,999993	6499324	6499308	5999335	5999358	-	-	-55,0708	-
2	7,017648	-4E+07	0,999993	6499205	6499209	5999790	5999819	6499171	5999553	81,89007	43,0391
3	-1,06272	12906935	0,999998	6499059	6499053	6000278	6000285	6499246	6000080	-46,7415	51,3684
4	2,394237	-9558775	1	6498940	6499055	6001228	6001503	6498702	6000658	67,33119	65,9273
5	-2,48156	22130244	1	6499109	6498997	6002291	6002569	6499244	6001956	-68,052	44,6168
6	-4,63556	36128906	0,999999	6498898	6498814	6002890	6003279	6498933	6002728	-77,8265	9,7745
7	-85,921	5,64E+08	0,999475	6498751	6498750	6004342	6004441	6498760	6003529	-89,3332	11,5067
8	2,217374	-8405315	1	6498848	6499012	6005060	6005423	6498745	6004832	65,72539	24,9414

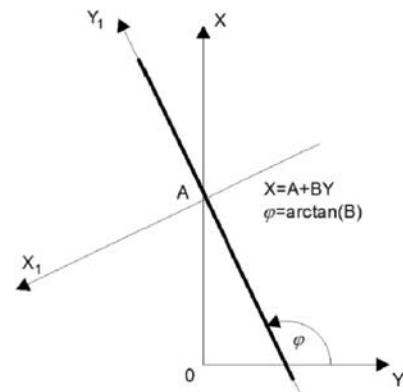


Rys. 1. Przykładowy poligon kierunków głównych trasy (proste 1-8 z tablicy 1)

3. Ocena odcinków prostych trasy

W celu przeprowadzenia oceny rzeczywistego kształtu toru na długości danej prostej dokonuje się jej transformacji do układu lokalnego (rys. 2) [8]. Jeżeli, wychodząc z równania $X = A + BY$, przesunie się oś Y o wartość wyrazu wolnego A i następnie dokona jej obrotu o kąt $\varphi = \arctan B$, pokryje się ona z kierunkiem naszej trasy. W układzie Y_1, X_1 punkt początkowy odcinka ma współrzędne (Y_p, X_p) , jednak ze względu na znaczny rząd wartości współrzędnych Y_1

wygodniej będzie operować w układzie Y_{lok}, X_1 , w którym punkt początkowy będzie miał odciętą zerową; uzyskuje się to przyjmując $Y_{lok} = Y_1 - Y_p$.



Rys. 2. Idea przeprowadzonej transformacji układu współrzędnych

Transformacji układu współrzędnych dokonuje się za pomocą następujących wzorów [10]:

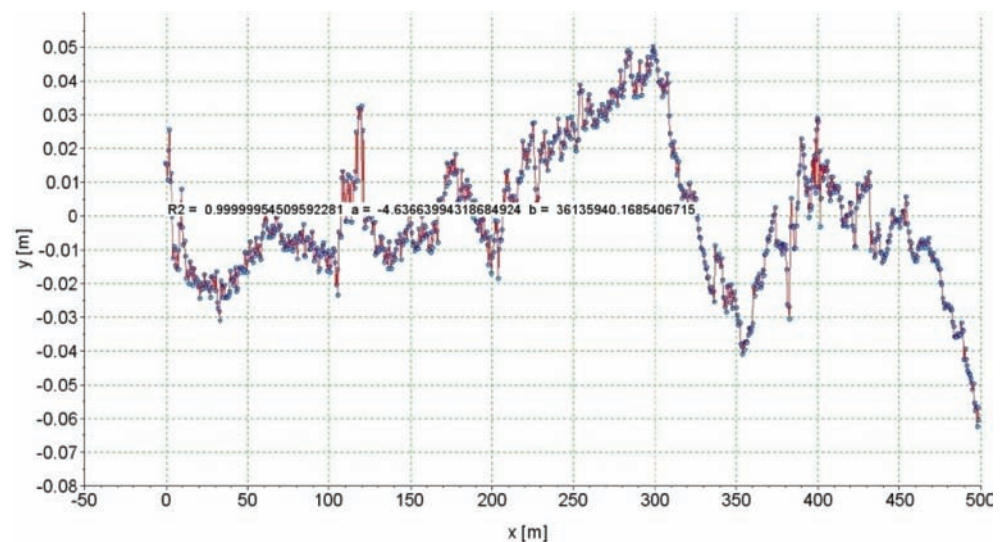
$$Y_1 = Y \cos \varphi + (X - A) \sin \varphi \quad (1)$$

$$X_1 = -Y \sin \varphi + (X - A) \cos \varphi \quad (2)$$

Wartości $\sin \varphi$ i $\cos \varphi$ wynikają z zależności:

$$\sin \varphi = \pm \frac{B}{\sqrt{1+B^2}}, \quad \cos \varphi = \pm \frac{1}{\sqrt{1+B^2}}.$$

Po dokonanej według algorytmu transformacji otrzymujemy wartości współrzędnych w układzie, w którym pozioma oś stanowi kierunek zgodny z osią toru na odcinku prostym. W związku z tym, na osi pionowej wartości różne od zera stanowią odchylenie sygnału GPS od kierunku mierzonej trasy. Wykres tych odchyleń na długości wybranego odcinka prostej trasy pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Wykres wartości odchyleń poziomych na długości wybranego odcinka prostej trasy

4. Projektowanie trasy położonej w łuku

Znajomość współrzędnych osi toru była inspiracją do opracowania nowej, analitycznej metody projektowania układów geometrycznych [4, 5]. Odpowiedni program komputerowy, wykorzystujący algorytmy obliczeniowe nowej metody projektowania, stwarza możliwość generowania praktycznie nieograniczonej liczby kolejnych wariantów nowego przebiegu trasy. Warianty te podlegają ocenie w procesie optymalizacji wielokryterialnej, w wyniku czego, następuje wybór najbardziej korzystnego rozwiązania. Procedura ta wyznacza założenia dla nowej, efektywnej metody regulacji osi toru [9].

Aby można było wykorzystywać uzyskane dane pomiarowe do zaprojektowania rejonu zmiany kierunku trasy należy, interesujący nas jej fragment, wyodrębnić z całości układu geometrycznego oraz dokonać odpowiedniej transformacji (przesunięcia i obrotu) układu współrzędnych. Wzory określające nowe współrzędne trasy w przesuniętym do punktu $O(Y_0, X_0)$ i obróconym o kąt β lokalnym układzie współrzędnych x, y opisują zależności [10]:

$$x = (Y - Y_0)\cos\beta + (X - X_0)\sin\beta \quad (3)$$

$$y = -(Y - Y_0)\sin\beta + (X - X_0)\cos\beta \quad (4)$$

Wartość kąta β jest określana następującym wzorem:

$$\beta = a \tan \left(\frac{B_1\sqrt{1+B_2^2} \pm B_2\sqrt{1+B_1^2}}{\sqrt{1+B_2^2} \pm \sqrt{1+B_1^2}} \right) \quad (5)$$

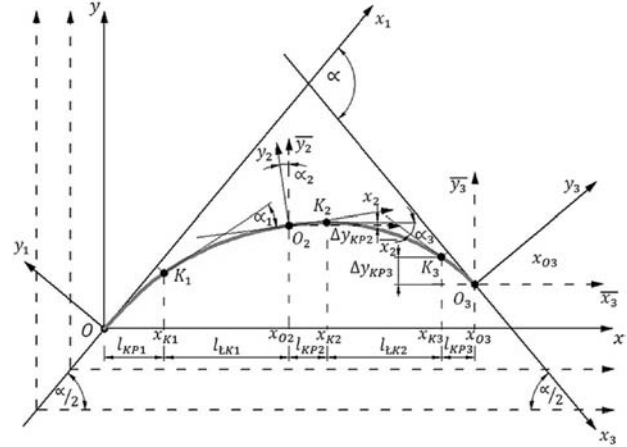
Znaki we wzorze (5) to „+” albo „-” w liczniku i mianowniku; wynikają one z konfiguracji współczynników B_1 i B_2 oraz kierunku zwrotu trasy (w lewo lub w prawo). Podstawowe zasady wykorzystywanej analitycznej metody projektowania to:

- brak jakichkolwiek założeń upraszczających,
- zapis matematyczny poszczególnych elementów geometrycznych,
- połączenie ze sobą poszczególnych elementów,
- zachowanie warunku styczności w miejscach połączeń.

Stosowany algorytm obliczeniowy powinien być dostosowany do typu występującego układu geometrycznego. Przykładowo, dla łuku kosowego (rys. 4) nowe rzędne osi toru są określane dla przyjętych następujących danych wejściowych:

- kąta zwrotu stycznych α ,
- promieni łuków kołowych R_1 i R_2 ,
- wartości przechyłki na łuku h_1 i h_2 ,
- długości pierwszego łuku kołowego l_{R1} ,

- długości l_1 , l_2 i l_3 przyjętych postaci krzywych przejściowych.



Rys. 4. Wybrany projektowany układ geometryczny w lokalnym układzie współrzędnych [4]

Tworzenie zapisu analitycznego odbywa się sekwencyjnie, obejmując kolejne fragmenty układu geometrycznego trasy: pierwszą krzywą przejściową (KP1), pierwszy łuk kołowy (ŁK1), drugą krzywą przejściową (KP2), drugi łuk kołowy (ŁK2) oraz trzecią krzywą przejściową (KP3). Długość drugiego łuku kołowego l_{R2} stanowi wartość wynikową, zamykającą całość układu geometrycznego.

Końcowym etapem obliczeń jest przeniesienie otrzymanego rozwiązania do układu globalnego przy wykorzystaniu wzorów [10]:

$$Y = Y_0 + x\cos\beta - y\sin\beta \quad (6)$$

$$X = X_0 + x\sin\beta + y\cos\beta \quad (7)$$

W wyniku zastosowania odpowiedniego algorytmu obliczeniowego opracowano program komputerowy, który umożliwi szybkie zaprojektowanie poprawnego układu geometrycznego, praktycznie w dowolnej liczbie wariantów. Dane do projektowania stanowi tablica pomierzonych punktów pomiarowych, obejmująca swoim zakresem interesujący rejon trasy. Zasadniczy etap działań polega na wprowadzaniu przez użytkownika (lub w sposób zautomatyzowany) kolejnych wartości sterujących (promieni łuków kołowych i długości krzywych przejściowych), dla których program komputerowy ma wygenerować wariant przebiegu trasy pomiędzy określonymi wcześniej kierunkami głównymi. W tej sytuacji rola projektanta polega głównie na podejmowaniu decyzji związanych głównie z kształtowaniem profilu prędkości na danej linii. Wspomaganie komputerowe przynosi zatem wysiłek związany z czynnościami obliczeniowymi oraz prezentacyjnymi na proces decyzyjny.

5. Kryteria optymalizacji

Wyboru wariantu do realizacji dokonuje się na podstawie dwóch kryteriów:

- wartości różnic rzędnych poziomych nowo zaprojektowanych i rzędnych istniejących,
- największej możliwej do uzyskania prędkości jazdy pociągów.

Mnogość uzyskiwanych wariantów układów geometrycznych jest osiągana przez nadawanie zróżnicowanych wag wymienionym dwóm kryteriom (przez modyfikację funkcji celu) oraz przez zmianę parametrów przeprowadzanych oddzielnie procesów optymalizacji.

Kryterium minimalizacji przesunięć poprzecznych wymaga określenia rzędnych projektowych w punktach pomiaru rzędnych istniejących. O prędkości jazdy po układzie geometrycznym, złożonym z łuku kołowego i krzywych przejściowych, decyduje relacja prędkości $v_{\downarrow} \max^{\uparrow} R$ wynikająca z promienia łuku R [1]

$$v_{\downarrow} \max^{\uparrow} R = 3,6 \sqrt{a_{\downarrow} \text{dop} + \frac{g h_{\downarrow} \max}{s}} \sqrt{R} \quad (8)$$

oraz mniejszej spośród odpowiadających prędkości na krzywej przejściowej ($v_0^{l,\psi}$ lub $v_0^{l,f}$):

$$v_0^{l,\psi} = 3,6 \frac{\psi_{\text{dop}}}{C a_{\text{dop}}} l_k, \quad (9)$$

$$v_0^{l,f} = 3,6 \frac{f_{\text{dop}}}{C h_{\max} l_k}, \quad (10)$$

gdzie:

- a_{dop} – dopuszczalna wartość przyspieszenia niezrównoważonego na łuku kołowym [m/s²],
- h_{\max} – przechyłka maksymalna na łuku kołowym [mm],
- ψ_{dop} – dopuszczalna wartość przyrostu przyspieszenia [m/s³],
- f_{dop} – dopuszczalna wartość prędkości podnoszenia koła na rampie przechyłkowej [mm/s],
- l_k – długość krzywej przejściowej [m],
- s – odległość między osiami szyn [mm],
- g – stała grawitacji [m/s²],
- C – współczynnik liczbowy zależny od rodzaju krzywej przejściowej [4].

Możliwe jest pełne wykorzystanie prędkości $v_{\downarrow} \max^{\uparrow} R$ lub jej ograniczenie ze względu na długość krzywej przejściowej [6]. W przypadku $v_{\downarrow} \max^{\uparrow} R \leq \min(v_{\downarrow} 0^{\uparrow}(l,\psi), v_{\downarrow} 0^{\uparrow}(l,f))$ przyjmuje się prędkość na całym układzie

$$v_{\downarrow} 0^{\uparrow}(R,l) = v_{\downarrow} \max^{\uparrow} R. \quad (11)$$

W przypadku $v_{\downarrow} \max^{\uparrow} R > \min(v_{\downarrow} 0^{\uparrow}(l,\psi), v_{\downarrow} 0^{\uparrow}(l,f))$ obowiązuje warunek $v_{\downarrow} 0^{\uparrow}(R,l) < v_{\downarrow} \max^{\uparrow} R$. W celu określenia prędkości $v_0^{R,l}$ należy zwiększyć prędkości $v_0^{l,\psi}$ i $v_0^{l,f}$ na krzywej przejściowej przez zmniejszenie wartości a_{dop} i h_{\max} we wzorach (9) i (10). Odbywa się to przez zastosowanie współczynników redukcyjnych $k_i \leq 1$, $i = 1, 2$; otrzymuje się wówczas $a_0 = k_i a_{\text{dop}}$ oraz $h_0 = k_i h_{\text{dop}}$. Wprowadzenie tych współczynników do równania (8) powoduje zmniejszenie prędkości na łuku kołowym do wartości v_0^R .

Do wyznaczenia współczynnika k_1 wykorzystuje się warunek $v_0^{l,\psi} = v_0^R$, a do wyznaczenia k_2 warunek $v_0^{l,f} = v_0^R$. Ostateczny wzór na największą prędkość na całym układzie jest następujący:

$$v_0^{R,l} = \min \left(3,6 \sqrt{k_i a_{\text{dop}} + g \frac{k_i h_{\max}}{s}} \sqrt{R} \right), i = 1, 2. \quad (12)$$

6. Proces optymalizacji wyboru wariantu

Wyznaczanie parametrów geometrycznych odtwarzanego układu następuje w procesie optymalizacji. W rozpatrywanym przypadku funkcja celu jest sumą ważoną miary przesunięć poprzecznych i największej prędkości możliwej do uzyskania podczas jazdy po całym układzie geometrycznym złożonym z łuku kołowego i dwóch krzywych przejściowych.

$$FC(R, l_1, l_2) = w_1 \frac{1}{n^k} \sum_{i=1}^n |y_i - p y_i| - w_2 v_0^{R,l} \quad (13)$$

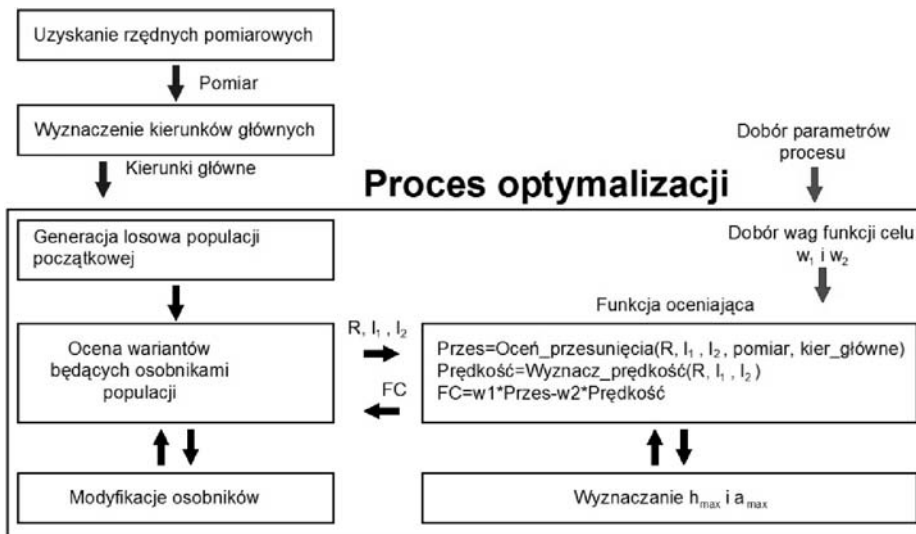
gdzie:

- FC – wartość funkcji oceniającej (funkcja celu),
- w_i – arbitralnie ustalone wagi,
- n – liczba uwzględnionych próbek reprezentujących rzędne łuku kołowego,
- k – parametr zapewniający skalowanie miary przesunięć,
- y_i – rzędne odtwarzanego łuku o promieniu R , łączącego dwa kierunki proste w układzie z dwiema krzywymi przejściowymi o długościach l_1 i l_2 ,
- $p y_i$ – rzędne wynikające z pomiarów.

Proces optymalizacji przebiega według schematu przedstawionego na rysunku 5. Przygotowano dwie uniwersalne funkcje odpowiadające przyjętym kryteriom:

- Oceń_przesunięcia (R, l_1, l_2 , Pomiar, Kierunki_główne): miara_przesunięć,
- Wyznacz_prędkość (R, l_1, l_2): maksymalna_prędkość,

których wynikiem są główne parametry funkcji celu (13) obliczane na podstawie wartości $[R, l_1, l_2]$, rzędnych pomierzonych oraz wyznaczonych kierunków głównych.



Rys. 5. Schemat przebiegu procesu optymalizacji układu geometrycznego [rys. autor]

Testowano zastosowanie dwóch algorytmów optymalizacji:

- algorytmu roju cząstek PSO (*Particle Swarm Optimization*) [3, 12],
- algorytmu genetycznego [2, 11].

Algorytm PSO (PSO-Toolbox v. 0.7-1 dostępny w SciLab v. 5.4.0) [12] działa wykorzystując populację cząstek poruszających się w przestrzeni rozwiązań. Każda cząstka reprezentuje potencjalne rozwiązanie problemu, np. szukany promień łuku R oraz długości dwóch krzywych przejściowych l_1 i l_2 . Cząstki zmieniają swoje położenie w kierunku uzależnionym od najlepszego dotychczasowego położenia cząstki, najlepszego dotychczasowego położenia cząstek sąsiednich oraz własnej prędkości. Modyfikacja prędkości cząstki następuje zgodnie z odpowiednią formułą [7]. Parametry procesu PSO podano w tablicy 2.

Tablica 2

Parametry procesu Particle Swarm Optimization

Parametr	Wartość przykładowa
Początkowa wartość współczynnika bezwładności w_{max}	0,9
Końcowa wartość współczynnika bezwładności w_{min}	0,4
Indywidualny współczynnik uczenia C_1	0,7
Grupowy współczynnik uczenia C_2	1,47
Liczba iteracji N	100
Rozmiar populacji	100

Algorytm genetyczny operuje na populacji osobników (zakodowanych rozwiązań problemu, w tym

przypadku wariantów układu geometrycznego opisanego promieniem łuku R oraz długościami dwóch krzywych przejściowych l_1 i l_2). Osobniki podlegają ocenie, na podstawie której odbywa się selekcja, czyli wybór członków nowej populacji. Wybrane osobniki podlegają krzyżowaniu (reprodukcja) i mutacjom, które zachodzą z ustalonymi na początku procesu częstotliwościami. Parametry procesu genetycznego zawiera tablica 3.

Tablica 3

Parametry procesu Algorytmu Genetycznego

Parametr	Wartość przykładowa
Częstotliwość krzyżowania	0,6
Częstotliwość mutacji	0,3
Liczba iteracji N	100
Rozmiar populacji	200

Istotny wpływ na przebieg oraz wyniki procesu ma rozmiar populacji oraz wybór metody selekcji (turniejowa / ranking / ruletka, z elitarnością lub bez). Metoda selekcji oraz wagi funkcji celu (13) oddziałują na końcowy wynik – uzyskiwany wariant układu geometrycznego.

Różne metody selekcji mogą prowadzić do różnego składu nowej populacji. Silna presja selekcyjna (np. w metodzie turniejowej) sprawia, że osobniki najsilniejsze mogą szybciej zdominować nowe pokolenie. W metodzie turniejowej i metodzie rankingowej występuje silna zależność od najdrobniejszych różnic w wartości FC. W metodzie selekcji opartej na zasadzie ruletki, gdzie prawdopodobieństwo jest uzależnione od względnej wartości FC osobnika na tle całej populacji, prawdopodobieństwa przejścia do następ-

nego pokolenia osobników o zbliżonych wartościach FC są zbliżone, przez co występuje mniejsza zależność od niewielkich różnic w wartościach FC.

Stosowano metodę selekcji opartą na zasadzie ruletki. Zaobserwowano duży wpływ zmian częstotliwości mutacji oraz rozmiaru populacji, niwelujący zmiany dokonywane przy wyborze wag w_1 i w_2 . Ocena cząstki reprezentującej rozwiązanie problemu jest przeprowadzana na podstawie różnic rzędnych odtwarzanego położenia łuku kołowego i rzędnych pomierzonych. W przypadku łuku kołowego z dwiema krzywymi przejściowymi obowiązuje przy tym wzór (13). Uwzględnienie w formule (13) parametru k służy ograniczeniu tendencji procesu do nadmiernego wydłużania krzywych przejściowych i minimalizacji przesunięć przez skracanie długości odtwarzanego łuku. W przypadku parametru $k = 1$ optymalizowany układ generuje mniejsze przesunięcia niż ma to w przypadku parametru $k = 2$, co oczywiście ma wpływ na uzyskane dopuszczalne prędkości dla danego układu.

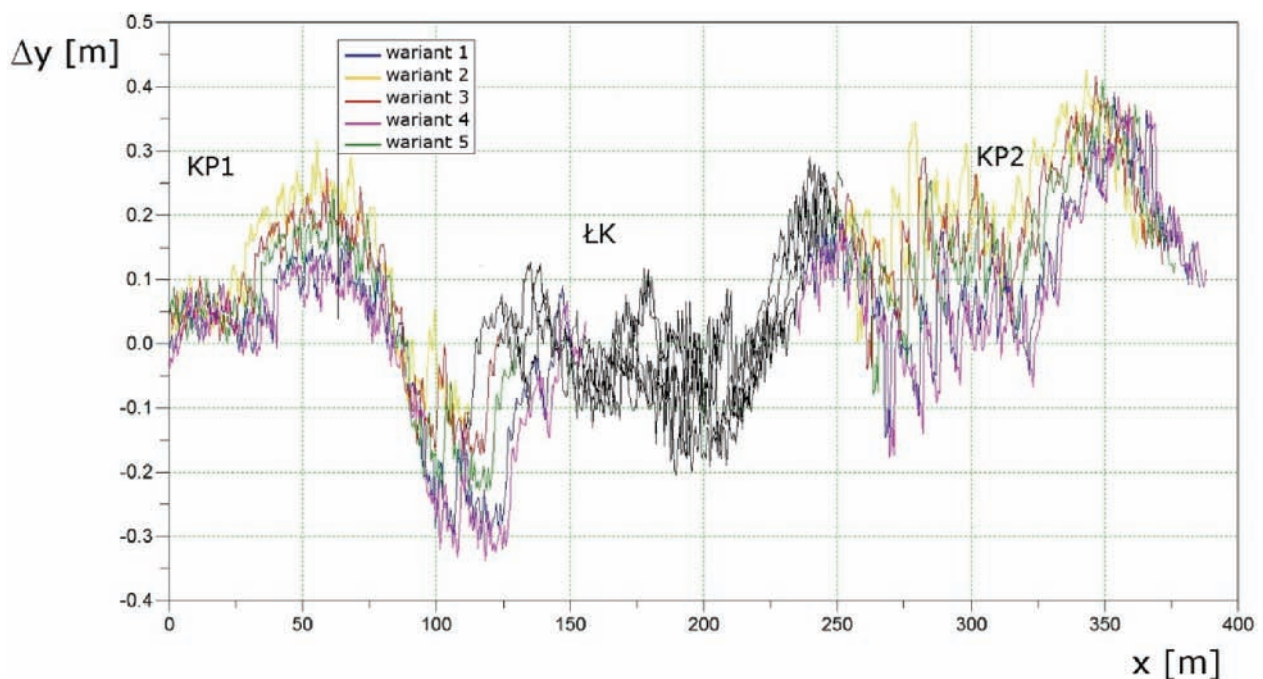
W prezentowanym przykładzie obliczeniowym wykorzystano obydwie przytoczone metody optymalizacyjne. Przy zastosowaniu funkcji celu (13) wyniki optymalizacji obydwu metod (PSO i AG) były zbliżone. W tablicach 4 i 5 przedstawiono otrzymane z wykorzystaniem algorytmu genetycznego wartości parametrów geometrycznych analizowanego układu wraz z odpowiadającą im prędkością maksymalną, natomiast na rysunkach 6 i 7 przedstawiono różnice rzędnych poziomych dla wybranych wariantów regulacji osi toru.

Tablica 4
Parametry geometryczne wraz z prędkością maksymalną wyznaczone w procesie optymalizacji (warianty 1–5)

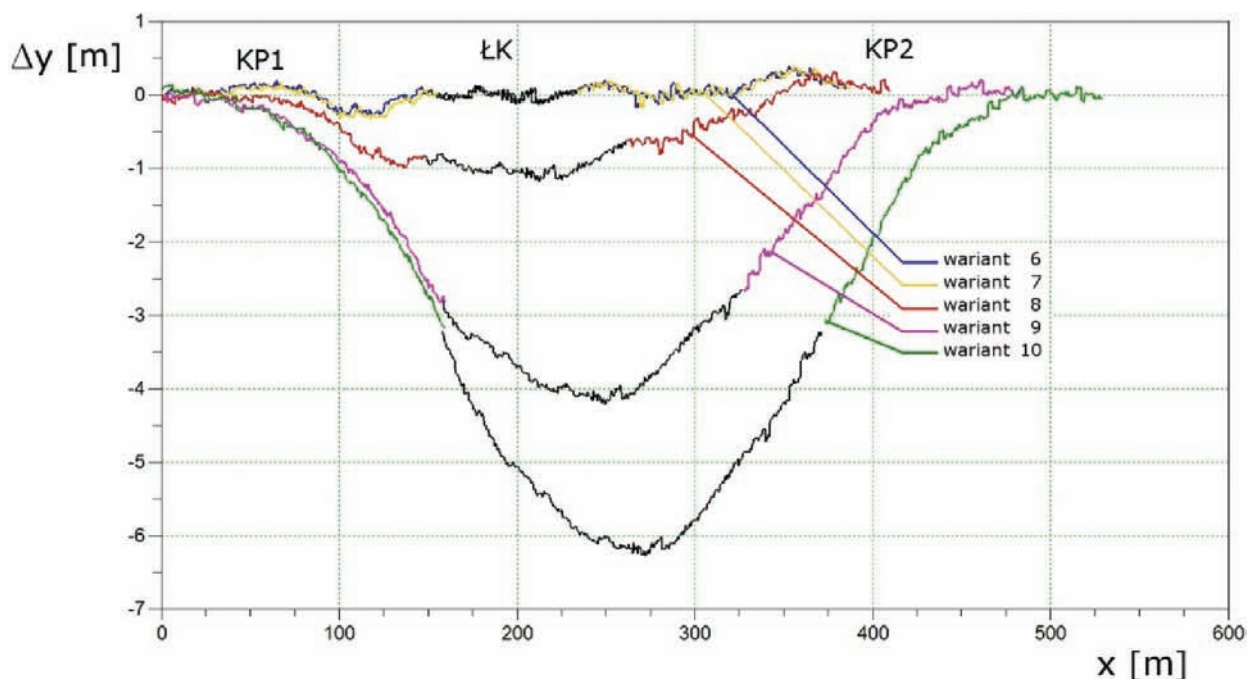
R [m]	l_1 [m]	l_2 [m]	V [km/h]	h [mm]
624,81	150,78	150,78	115,59	130
667,63	112,40	115,40	112,60	100
655,55	124,40	126,60	113,60	110
617,30	156,20	156,30	116,00	135
651,40	131,00	131,30	114,40	115

Tablica 5
Parametry geometryczne wraz z prędkością maksymalną wyznaczone w procesie optymalizacji (warianty 6–10)

R [m]	l_1 [m]	l_2 [m]	V [km/h]	h [mm]
623,70	148,50	153,40	115,20	130
617,00	156,00	156,00	116,00	135
690,00	150,00	150,00	120,00	125
860,00	160,00	160,00	133,00	120
980,00	160,00	160,00	140,00	115



Rys. 6. Różnice rzędnych poziomych dla wybranych wariantów regulacji osi toru (dominuje kryterium minimalizacji przesunięć)



Rys. 7. Różnice rzędnych poziomych dla wybranych wariantów podnoszenia prędkości jazdy pociągów [rys. autor]

Ocena wariantów 6–10 jest trudna z uwagi na niezdefiniowane warunki ograniczające w postaci obszaru możliwych do wykonania przesunięć. Warianty 6 i 7 mają bardzo zbliżone rozkłady różnic przy równie nieznacznym zysku prędkości. Warianty 9 i 10 w wyraźny sposób podnoszą prędkość maksymalną, jednak z dużym prawdopodobieństwem wartości przesunięć wykroczyłyby poza obszar dopuszczalny. Wariant 8 jest wariantem pośrednim. Przedstawione przykładowe wykresy ilustrują sposób modelowania układu geometrycznego z wykorzystaniem wag dotyczących prędkości i przesunięć. W znanych warunkach ograniczających, proces optymalizacji może dążyć do osiągnięcia poprawy prędkości bądź parametrów kinematycznych projektowanych układów geometrycznych.

7. Podsumowanie

Podjęte w Polsce w latach 2011–2012 działania polegające na tworzeniu punktów osnowy, mających określone współrzędne w państwowym systemie odniesień przestrzennych, stworzyły możliwość wyznaczania za pomocą tachimetru współrzędnych osi toru co 10–20 m. Ponieważ dla celów projektowych jest to niewystarczające, w stosowanej procedurze projektowania regulacji osi toru w dalszym ciągu trzeba wykorzystywać wykresy strzałek poziomych jako podstawę identyfikacji elementów geometrycznych trasy.

Technika mobilnych pomiarów satelitarnych pozwala w sposób precyzyjny, z krokiem 200÷300 mm i nieporównywalnie szybszy wyznaczać współrzędne istniejącej osi toru. Na ich podstawie można oceniać dany układ geometryczny i modyfikować ukształtowanie torów w sposób racjonalny i zgodny z uniwersalnymi zasadami projektowania. W połączeniu z opracowaną analityczną metodą projektowania układów geometrycznych i odpowiednim programem komputerowym, pojawia się możliwość generowania w praktycznie nieograniczonej liczbie kolejnych wariantów nowego przebiegu trasy.

Warianty te podlegają ocenie w procesie optymalizacji wielokryterialnej, w wyniku czego następuje wybór najbardziej korzystnego rozwiązania. Funkcja celu procesu optymalizacji została oparta na wartości różnic rzędnych poziomych nowo zaprojektowanych i rzędnych istniejących (kryterium minimalizacji przesunięć poprzecznych) oraz największej możliwej do uzyskania prędkości jazdy pociągów (kryterium prędkości). Testowano zastosowanie dwóch algorytmów optymalizacji: algorytmu roju cząstek PSO (*Particle Swarm Optimization*) oraz algorytmu genetycznego.

Literatura

1. Bałuch H.: *Optymalizacja układów geometrycznych toru*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1983.

2. Goldberg D.: *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995.
3. Kennedy J., Eberhart R.: *Swarm intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco 2001.
4. Koc W.: *Design of compound curves adapted to the satellite measurements*, The Archives of Transport, vol. 34, issue 2, str. 37–49, 2015.
5. Koc W.: *Design of rail-track geometric systems by satellite measurement*, Journal of Transportation Engineering, vol. 138, No. 1, str. 114–122, 2012.
6. Koc W.: *Elementy teorii projektowania układów torowych*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2004.
7. Koc W., Chrostowski P., Palikowska K.: *Projektowanie układów geometrycznych toru z zastosowaniem optymalizacji wielokryterialnej*, Logistyka, nr 6, str. 5530–5539, 2014.
8. Koc W., Specht C.: *Selected problems of determining the course of railway routes by use of GPS network solution*, Archives of Transport, vol. XXIII, issue 3, str. 303–320, 2011.
9. Koc W., Specht C., Chrostowski P., Palikowska K.: *Podstawowe założenia metody regulacji osi toru z wykorzystaniem mobilnych pomiarów satelitarnych*, Przegląd Komunikacyjny, rocznik LXX, nr 9, str. 24–28, 2015.
10. Korn G.A., Korn T.M.: *Matematyka dla pracowników naukowych i inżynierów*, PWN, Warszawa 1983.
11. Michalewicz Z.: *Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne*, WNT, Warszawa 1996.
12. Salmon S., Baudin M., Cornet A.: *Particle Swarm Optimization Toolbox v. 0.7-1*, <http://forge.scilab.org/index.php/p/pso-toolbox/>.
13. Specht C.: *System GPS*, Wydawnictwo BERNARDINUM, Pelplin 2007.
14. Specht C., Nowak A., Koc W., Jurkowska A.: *Application of the Polish Active Geodetic Network for railway track determination*, Transport Systems and Processes – Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, CRC Press – Taylor & Francis Group, str. 77–81, London 2011.
15. Szwilski T., Begley R., Dailey P., Sheng Z.: *Determining rail track movement trajectories and alignment using HADGPS*, Proceedings of the AREMA 2003 Annual Conference, Chicago, October 2003.

Universal Design Method of the Track Axis Adjustment with the Use of the Satellite Measurements and Optimization

Summary

In the article the limitations of applied in our country track axis adjustment methodology related mostly with the accuracy in determination of the existing track shape has been discussed. As an alternative, the authors indicate the innovative method developed by an interdisciplinary scientific team (Gdansk University of Technology and Polish Naval Academy / Maritime University in Gdynia) which has been developing since 2009. The essence of that method is the technique of mobile satellite measurements. The mentioned measurement technique was an inspiration for developing new analytical methods of design of geometric layouts and formulating principles for modern method of the axis adjustment design. In the analytical designing method the individual elements of the geometric layout are defined in the form of mathematical equations. These equations implemented in the computer program allows for generating subsequent variations of the route without any restrictions for the number of these variants. Calculating of the geometric parameters of the investigated layout occurs in the optimization process by the use of Particle Swarm Optimization PSO and Genetic Algorithm. Since the process has a multi-criteria character, the proper establishment of weights of each criterion is required. The main criteria used in the study are: minimizing lateral movements of the track and maximizing the speed of trains.

Keywords: railway track, geometric layout, satellite measurements, design, optimizing of variant choice, computer aided design

Универсальный метод проектирования регуляции оси пути с употреблением спутниковых измерений и оптимизации

Резюме

В работе обращено внимание на ограничения используемой в нашей стране методики регулирования оси пути связаны в главной степени с получаемой точностью определения существующей формы пути. В виде альтернативного решения указано разработанную междисциплинарным научным коллективом Гданьского политехнического университета и Морской военной академии / Морской академии в Гдыне и используемую с 2009 года новаторскую технику мобильных спутниковых измерений. Возможность использования этих измерений была инспирацией для разработки аналитического метода проектирования геометрической схемы и впоследствии сформулирования предположений для нового метода регуляции оси пути. Определение геометрических параметров схемы наступает в процессе оптимизации методом роя частиц PSO (Particle Swarm Optimization) и генетического алгоритма. Оптимизация имеет многокритериальный характер, и поэтому требует правильного подбора весов отдельных критериев. Основными употребляемыми критериями являются: минимизация поперечного перемещения пути и получение самой большой скорости поездов.

Ключевые слова: геометрическая схема пути, спутниковые измерения, проектирование, оптимизация подбора варианта, компьютерная поддержка