

Zbigniew KĘDRA

Politechnika Gdańska

OPTIMALIZACJA REGULACJI OSI TORU KOLEJOWEGO W PŁASZCZYZNIE POZIOMEJ

Streszczenie. W referacie przedstawiono problem optymalnej regulacji toru w planie. Metoda optymalizacji przesunięć oparta jest na wynikach pomiarów elektronicznymi toromierzami uniwersalnymi. Kryterium funkcji celu jest osiągnięcie minimum przesunięć toru przy określonych warunkach ograniczających.

OPTIMIZATION OF REGULATION OF RAILWAY TRACK AXIS IN HORIZONTAL PLANE

Summary. The paper presents a problem optimum of track lining. Method of optimization of slip of railway track rests on automatic results of measurements. Criterion of objective function is minimum of slip at definite conditions limiting.

1. Wstęp

Od dokładnego położenia toru w płaszczyźnie pionowej i poziomej zależy w dużym stopniu przebieg procesów jego degradacji, wysokość wydatkowanych środków na utrzymanie dróg kolejowych i spokojność jazdy. Kształtowanie toru w końcowej fazie jego budowy, a następnie eksploatacji, zwane regulacją, wykonują obecnie automatyczne podbijaki, wymagające jednak obsługi pomiarowej.

Regulacja osi toru kolejowego, a w zasadzie projekt regulacji osi toru polega na ponownym zaprojektowaniu jego osi w celu usunięcia powstałych nierówności lub skorygowania niewłaściwego układu geometrycznego. Przyjmuje się, że przy regulacji osi toru bazą tyczenia jest oś toru istniejącego. Pozwala to na optymalizację projektowanego układu torowego poprzez minimalizację przesunięć osi toru lub minimalizację maksymalnego przesunięcia. Wiąże się to również ze znacznym zmniejszeniem zakresu robót przy regulacji osi toru.

W metodach regulacji osi toru w płaszczyźnie poziomej można bez trudu odnotować wiele zmian. Po powszechnym stosowaniu w Europie, w latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych, metody wykresu kątów [3, 6, 7] opracowano kilka metod algorytmicznych – począwszy od tzw. metody półprzesunięć [1, 4, 8]. Na przełomie lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych zaczęły się pojawiać metody numeryczne. Metody te – nie licząc tzw. korektora krzywizn i nieudanego przyrządu jednej z firm zagranicznych – były oparte na ręcznym, a więc pracochłonnym i niezbyt dokładnym pomiarze strzałek.

Drugim nurtem, rozwijanym zwłaszcza w latach dziewięćdziesiątych przez producentów maszyn torowych, były dodatkowe systemy pomiarowe podbijarek. Ich działanie sprowadza się do tego, że podbijarka przejeżdża przez zadany odcinek toru nie podbijając go (czyli spełnia rolę wagonu pomiarowego), zarejestrowane wyniki są następnie przetwarzane według algorytmów optymalizujących cechy geometryczne i stanowią podstawę automatycznego sterowania tej maszyny w procesie podbijania. Mimo dużej nowoczesności tego rozwiązania ma ono dwie wady – jest bardzo drogie i w swych algorytmach nie uwzględnia wpływu przesunięć, w konkretnym stanie nawierzchni, na jej późniejsze odkształcenia.

W ostatnich latach trwają poszukiwania nowych, lecz czysto geodezyjnych, metod regulacji toru z zastosowaniem systemu GPS i stacji geodezyjnych. Metody te pomijają jednak całkowicie problemy mechaniki toru.

2. Metoda optymalizacji przesunięć osi toru kolejowego w płaszczyźnie poziomej

Przyjmuje się, że przy regulacji osi toru bazą tyczenia jest oś toru istniejącego, a pomiar strzałek wykonuje się elektronicznym toromierzem uniwersalnym.

Rozwiązanie zagadnienia optymalizacji przesunięć osi toru w płaszczyźnie poziomej zostanie ograniczone do odcinków krzywoliniowych, tj. łuków z przyległymi krzywymi przejściowymi. W takim przypadku obliczenie wartości strzałki projektowanej sprowadza się do wyznaczenia nieznanymi przemieszczeń w punktach podziału łuku. Zależność między strzałką projektową a pomierzoną i przemieszczeniami jest wyrażona wzorem:

$$F_n = f_n + l_n - \frac{l_{n-1} + l_{n+1}}{2}, \quad (1)$$

gdzie:

F_n – wartość zaprojektowanej strzałki łuku,

f_n – wartość pomierzonej strzałki łuku,

n – numer punktu podziału łuku,

l – wartość nieznanymi przemieszczenia.

Poszukując optymalnego rozwiązania należy spełnić określone warunki ograniczające wynikające z geometrii krzywej, płynności łuku i prostej, wpisania się projektowanego łuku w istniejący kąt zwrotu oraz ograniczenia wynikające z kierunku i wielkości przesunięcia.

Ograniczenia związane z geometrią krzywej (różnica między strzałką nominalną i projektową) można wyrazić zależnością:

$$|F - F_n| \leq \Delta\Delta F, \quad (2)$$

gdzie:

F – nominalna strzałka łuku,

$\Delta\Delta F$ – dopuszczalna różnica między strzałką nominalną (przyjętą lub obliczoną) i projektowaną.

Zatem:

$$F - F_n = F - \left(f_n + l_n - \frac{l_{n-1} + l_{n+1}}{2} \right) = F - f_n - l_n + \frac{l_{n-1} + l_{n+1}}{2} \quad (3)$$

Oznaczając różnicę między strzałką nominalną a strzałką pomierzoną wyrażeniem:

$$\Delta_n = F - f_n$$

otrzymamy dwa warunki ograniczające w każdym punkcie podziału łuku:

$$\begin{cases} \Delta_n - l_n + \frac{l_{n-1} + l_{n+1}}{2} \leq \Delta\Delta F \\ \Delta_n - l_n + \frac{l_{n-1} + l_{n+1}}{2} \geq -\Delta\Delta F \end{cases} \quad (4)$$

Po przekształceniu otrzymamy:

$$\begin{cases} l_{n-1} - 2l_n + l_{n+1} \leq 2\Delta\Delta F - 2\Delta_n \\ l_{n-1} - 2l_n + l_{n+1} \geq -2\Delta\Delta F - 2\Delta_n \end{cases}$$

Kolejny warunek ograniczający wynika z płynności krzywizny (różnica między sąsiednimi strzałkami) i może być wyrażony w postaci:

$$|F_{n+1} - F_n - \delta_n| \leq \Delta F, \quad (5)$$

gdzie:

$F_{n+1} - F_n$ - różnica sąsiednich strzałek,

δ_n - przyrost strzałki na krzywej przejściowej (na łuku i prostej $\delta_n = 0$),

$$\delta_n = F_n^{kp} - F_n^{np}$$

F_n^{kp} - nominalna wartość strzałki na krzywej przejściowej.

Wartość projektowanej strzałki w punkcie n+1 wyznaczmy ze wzoru:

$$F_{n+1} = f_{n+1} + l_{n+1} - \frac{l_n + l_{n+2}}{2} \quad (6)$$

Po podstawieniu wyrażeń (1) i (6) do warunku (5) otrzymamy:

$$\begin{cases} f_{n+1} + l_{n+1} - \frac{l_n + l_{n+2}}{2} - f_n - l_n + \frac{l_{n-1} + l_{n+1}}{2} - \delta_n \leq \Delta F \\ f_{n+1} + l_{n+1} - \frac{l_n + l_{n+2}}{2} - f_n - l_n + \frac{l_{n-1} + l_{n+1}}{2} - \delta_n \geq -\Delta F \end{cases} \quad (7)$$

Po uproszczeniu i pomnożeniu przez 2 otrzymamy dwa warunki ograniczające w każdym punkcie podziału łuku:

$$\begin{cases} 2f_{n+1} - 2f_n + l_{n-1} - 3l_n + 3l_{n+1} - l_{n+2} - 2\delta_n \leq 2\Delta F \\ 2f_{n+1} - 2f_n + l_{n-1} - 3l_n + 3l_{n+1} - l_{n+2} - 2\delta_n \geq -2\Delta F \end{cases} \quad (8)$$

Trzeci warunek ograniczający związany jest z kierunkiem i wielkością przesunięcia toru, tj. uzyskanie przesunięć jednostronnych, ograniczenie przesunięć co do znaku i wielkości oraz wymuszenie lub pozostawienie jednego lub kilku punktów w określonym położeniu. Warunki te traktowane są jako dodatkowe wiążące oś toru z terenem i obiektami inżynierskimi (np. słupy trakcji elektrycznej, odległości od punktów stałych).

$$\begin{aligned} l_n &\leq e_n^p \\ l_n &\geq e_n^l \\ l_n &= e_n, \end{aligned} \quad (9)$$

gdzie:

e_n^p – ograniczenie przesunięć z prawej strony osi liczbowej,

e_n^l – ograniczenie przesunięć z lewej strony osi liczbowej,

e_n – ograniczenie przesunięć co do wartości.

Funkcja celu uwzględniająca minimalne przesunięcia z jednoczesnym ograniczeniem przesunięć maksymalnych przyjmie postać:

$$\min \sum_{n=0}^N l_n^2, \quad (10)$$

gdzie N – liczba punktów podziału łuku,

przy następujących warunkach ograniczających w każdym punkcie podziału łuku:

$$\begin{cases} l_{n-1} - 2l_n + l_{n+1} &\leq 2\Delta\Delta F - 2\Delta_n \\ l_{n-1} - 2l_n + l_{n+1} &\geq -2\Delta\Delta F - 2\Delta_n \\ l_{n-1} - 3l_n + 3l_{n+1} - l_{n+2} &\leq 2\Delta F - 2f_{n+1} + 2f_n + 2\delta_n \\ l_{n-1} - 3l_n + 3l_{n+1} - l_{n+2} &\geq -2\Delta F - 2f_{n+1} + 2f_n + 2\delta_n \end{cases} \quad (11)$$

W układzie warunków (11) należy dodatkowo uwzględnić warunek (9).

Rozpisując funkcję celu wraz z warunkami ograniczającymi otrzymamy:

$$\min z = l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 + \dots + l_n^2 + \dots + l_N^2 \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
 l_0 - 2l_1 + l_2 &\leq 2\Delta F - 2\Delta_1 \\
 l_0 - 2l_1 + l_2 &\geq -2\Delta F - 2\Delta_1 \\
 l_0 - 3l_1 + 3l_2 - l_3 &\leq 2\Delta F - 2f_2 + 2f_1 + 2\delta_1 \\
 l_0 - 3l_1 + 3l_2 - l_3 &\geq -2\Delta F - 2f_2 + 2f_1 + 2\delta_1 \\
 l_1 - 2l_2 + l_3 &\leq 2\Delta F - 2\Delta_2 \\
 l_1 - 2l_2 + l_3 &\geq -2\Delta F - 2\Delta_2 \\
 l_1 - 3l_2 + 3l_3 - l_4 &\leq 2\Delta F - 2f_3 + 2f_2 + 2\delta_2 \\
 l_1 - 3l_2 + 3l_3 - l_4 &\geq -2\Delta F - 2f_3 + 2f_2 + 2\delta_2 \\
 \dots & \\
 l_{n-1} - 2l_n + l_{n+1} &\leq 2\Delta F - 2\Delta_n \\
 l_{n-1} - 2l_n + l_{n+1} &\geq -2\Delta F - 2\Delta_n \\
 l_{n-1} - 3l_n + 3l_{n+1} - l_{n+2} &\leq 2\Delta F - 2f_{n+1} + 2f_n + 2\delta_n \\
 l_{n-1} - 3l_n + 3l_{n+1} - l_{n+2} &\geq -2\Delta F - 2f_{n+1} + 2f_n + 2\delta_n \\
 \dots & \\
 l_{N-2} - 2l_{N-1} + l_N &\leq 2\Delta F - 2\Delta_{N-1} \\
 l_{N-2} - 2l_{N-1} + l_N &\geq -2\Delta F - 2\Delta_{N-1} \\
 l_{N-2} - 3l_{N-1} + 3l_N - l_{N+1} &\leq 2\Delta F - 2f_N + 2f_{N-1} + 2\delta_{N-1} \\
 l_{N-2} - 3l_{N-1} + 3l_N - l_{N+1} &\geq -2\Delta F - 2f_N + 2f_{N-1} + 2\delta_{N-1} \\
 l_{N-1} - 2l_N + l_{N+1} &\leq 2\Delta F - 2\Delta_N \\
 l_{N-1} - 2l_N + l_{N+1} &\geq -2\Delta F - 2\Delta_N \\
 l_{N-1} - 3l_N + 3l_{N+1} - l_{N+2} &\leq 2\Delta F + 2f_N \\
 l_{N-1} - 3l_N + 3l_{N+1} - l_{N+2} &\geq -2\Delta F + 2f_N
 \end{aligned}$$

W proponowanym modelu liniowy zbiór ograniczeń połączony jest z nieliniową funkcją celu. Mamy zatem zadanie programowania kwadratowego. Taką klasę zagadnień można rozwiązać np. adaptowaną metodą sympleksów [2].

3. Przykład zastosowania proponowanej metody

Celem zilustrowania przedstawionej metody optymalnego projektowania przesunięć osi toru kolejowego z ograniczeniami odchyłek dopuszczalnych wykonano obliczenia w programie Excel modułem Solver. Tablica 1 zawiera dane do przykładu.

Tablica 1

Dane do przykładu

Numer punktu podziału	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Wartość strzałki nominalnej	0	0	10	20	30	30	30	20	10	0	0	0
Wartość strzałki pomierzonej	0	1	6	16	36	28	38	15	12	-2	0	0

Przeprowadzono obliczenia optymalnych przesunięć przy dwóch ograniczeniach funkcji celu. Pierwszy warunek uwzględnia dopuszczalną różnicę między strzałką nominalną a projektowaną, drugi zaś uwzględnia dopuszczalną różnicę między sąsiednimi strzałkami. Wyniki obliczeń przedstawia tabl.2.

Tablica 2

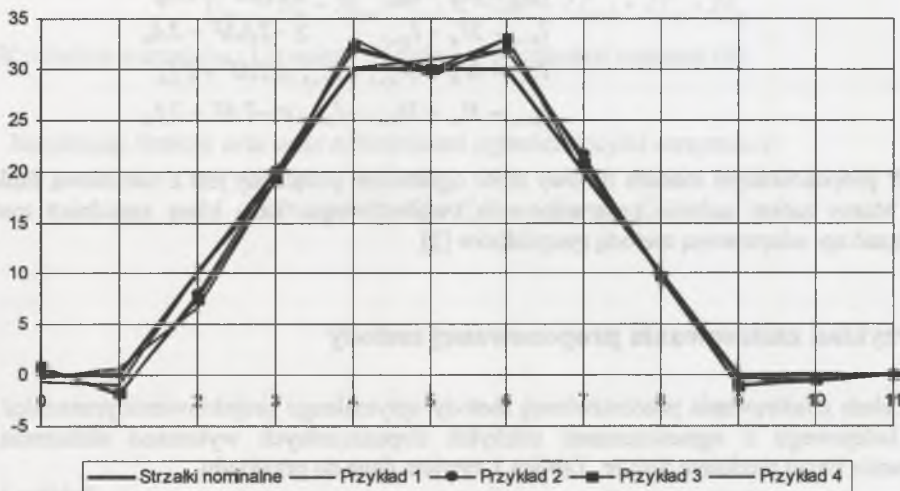
Wyniki obliczeń

Numer punktu podziału	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Wartość strzałki nominalnej	0	0	10	20	30	30	30	20	10	0	0	0
$\Delta\Delta_n=1$ $\Delta_n=1$ Wartość przesunięcia	0	1,5	6,8	4,0	-5,0	-2,2	-5,4	3,5	0,3	1,2	0	0
$\Delta_n=1$ Wartość strzałki projektowanej	-0,7	-0,9	10,1	19,1	30,1	31,0	32,0	21,0	10,0	-1,0	-0,6	0
$\Delta\Delta_n=2$ $\Delta_n=2$ Wartość przesunięcia	0	-1,1	3,7	4,6	-2,5	-1,6	-4,8	4,1	0	1,0	0	0
$\Delta_n=2$ Wartość strzałki projektowanej	0,6	-2,0	8,0	20,0	32,0	30,0	32,0	21,5	9,5	-1,0	-0,5	0
$\Delta\Delta_n=3$ $\Delta_n=3$ Wartość przesunięcia	0	-1,5	2,3	3,1	-2,7	-1,2	-3,6	4,0	0,1	0,9	0	0
$\Delta_n=3$ Wartość strzałki projektowanej	0,8	-1,7	7,5	19,3	32,3	30,0	33,0	20,8	9,7	-1,1	-0,5	0
$\Delta\Delta_n=4$ $\Delta_n=4$ Wartość przesunięcia	0	-0,4	1,1	2,7	-2,0	-0,9	-3,0	3,6	0,2	0,9	0	0
$\Delta_n=4$ Wartość strzałki projektowanej	-0,3	0,7	6,7	19,1	33,1	29,1	33,1	19,6	9,9	-0,3	-0,5	0

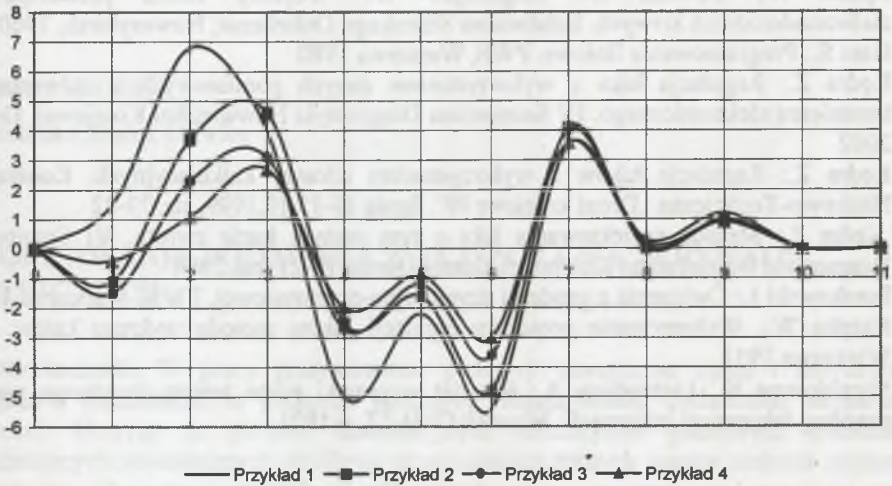
Funkcja celu przyjmuje wartość:

- dla przykładu pierwszego, gdzie: $\Delta\Delta_n=1$ $\Delta_n=1$ *minz* = 135,3
- dla przykładu drugiego, gdzie: $\Delta\Delta_n=2$ $\Delta_n=2$ *minz* = 85,2
- dla przykładu trzeciego, gdzie: $\Delta\Delta_n=3$ $\Delta_n=3$ *minz* = 55,3
- dla przykładu czwartego, gdzie: $\Delta\Delta_n=4$ $\Delta_n=4$ *minz* = 35,4

Na rysunku 1 i 2 przedstawiono graficznie wyniki przeprowadzonych obliczeń, tj. wartości strzałek projektowanych oraz optymalne przesunięcia dla 4 wartości dopuszczalnych odchyłek różnic między sąsiednimi strzałkami oraz strzałką nominalną i projektową.



Rys.1. Wykres zaprojektowanych strzałek
Fig.1. Graph of designed arrows



Rys.2. Wykres zaprojektowanych przesunięć
 Fig.2. Graph of designed slips

4. Podsumowanie

W dotychczasowych metodach nie korzystano z pomiarów ciągłych nierówności toru wykonywanych np. toromierzem elektronicznym oraz metody te nie uwzględniają wpływu przesunięć i podnoszenia toru na intensywność narastania odkształceń, spokojność jazdy i – pośrednio – na trwałość eksploatacyjną nawierzchni kolejowej oraz koszty jej utrzymania.

Celowe jest opracowanie metody optymalizacji przesunięć toru, opartej na wynikach pomiarów elektronicznymi toromierzami uniwersalnymi przy dwóch funkcjach celu (kryteriach), tj. minimalizacji wartości przesunięć lub minimalizacji różnic sąsiednich strzałek, z uwzględnieniem wpływu tych przesunięć na późniejsze odkształcenia. Opracowanie takiej metody wyeliminuje ręczny pomiar strzałek w łukach i krzywych przejściowych, a operator podbijarki otrzyma wykaz przesunięć optymalnych, tj. takich, przy których z jednej strony będą zachowane ograniczenia narzucone nie tylko skrajnią budowli, lecz również zbadanymi zjawiskami relaksacji, z drugiej zaś różnice sąsiednich strzałek nie przekroczą przyjętych granic, dopuszczalnych ze względu na spokojność jazdy pociągów.

Przedstawiona metoda eliminuje ręczny pomiar strzałek, a obliczone przesunięcia spełniają kryterium ich minimalizacji przy warunkach ograniczających wynikających z dopuszczalnych różnic między sąsiednimi strzałkami oraz spełniających warunki narzucone skrajnią budowli.

W przyszłych badaniach zostanie uwzględnione zjawisko relaksacji, a w szczególności wpływ metody projektowania przemieszczeń toru kolejowego na późniejszy proces jego deformacji.

Literatura

1. Djunin A., Kowtun D.: Angieliejko W.: Woprosy teorii proiektipowania zielieznodorożnich kriwych. Izdatielstwo Sibirskogo Otdielienia, Nowosybirsk, 1960
2. Gass S.: Programowanie liniowe. PWN, Warszawa 1980
3. Kędra Z.: Regulacja łuku z wykorzystaniem danych pomiarowych z uniwersalnego toromierza elektronicznego. IV Seminarium Diagnostyki Nawierzchni Kolejowej, Gdańsk 2002
4. Kędra Z.: Regulacja łuków z wykorzystaniem arkuszy kalkulacyjnych. Konferencja Naukowo-Techniczna „Drogi kolejowe 99”. Spała 13-15.10.1999, str. 77-82
5. Kędra Z.: Metoda projektowania łuku o tym samym kącie zwrotu. VI Seminarium Diagnostyki Nawierzchni Kolejowej, Gdańsk-Jurata 19-21 maj 2004
6. Ponikowski J.: Ćwiczenia z geodezji inżyniersko-przemysłowej. PWN, Warszawa 1973
7. Rzepka W.: Wykonywanie projektów regulacji łuków metodą wykresu kątów. WK, Warszawa 1951
8. Szczekotow N., Liebiediew A.: Rascziet wyprawki plana żeleznodorożnogo puti pri nepolnoj tekuszczej informacii. Wiestnik CNII ŻT, 6/1973