

SZWACZKIEWICZ Kamila

OBLICZANIE PRZESUNIĘĆ OSI TORU PRZY MODERNIZACJI ŁUKÓW PARABOLICZNYCH NA LINIACH KOLEJOWYCH

Streszczenie

Podstawowym zadaniem modernizacji linii kolejowych jest właściwe zaprojektowanie nowego układu geometrycznego, który będzie spełniał założone kryteria związane z parametrami eksploatacyjnymi danej linii. Dążąc do spełnienia przyjętych warunków nałożonych na projektowany układ, projektant najczęściej koryguje podstawowe parametry geometryczne, tj. przechyłkę, promień łuku kołowego oraz długości krzywych przejściowych.

W artykule w sposób szczegółowy omówiono jeden z charakterystycznych przypadków układu geometrycznego jakim jest łuk paraboliczny. Zaprezentowano metodykę obliczeniową związaną z przeprojektowaniem takiego układu krzywych przejściowych prowadzącą do otrzymania przesunięć istniejącej osi toru. Przedstawiono przykłady rozwiązane z wykorzystaniem programu komputerowego wspomagającego projektowanie układów geometrycznych MUGO.

WSTĘP

Głównym zadaniem modernizacji linii kolejowej jest zaprojektowanie układu geometrycznego toru, który będzie spełniał założone parametry techniczno-eksploatacyjne, a w szczególności kryterium maksymalnej prędkości jazdy pociągów. Projekt modernizacji powinien uwzględniać dotychczasowy układ geometryczny toru, stan istniejącej infrastruktury, jak również aspekty ekonomiczne związane z przebudową układu [1-7].

Pojęcie modernizacja definiuje się jako proces unowocześniania lub uwspółcześnienia [16]. Według Dyrektywy Parlamentu Europejskiego 2008/57/WE [2] oraz Technicznej Specyfikacji Interoperacyjności dla podsystemu „Infrastruktura” [4] modernizację linii kolejowych należy rozumieć jako większe prace modyfikacyjne prowadzone w danym podsystemie lub jego części, których celem jest poprawienie całkowitych osiągnięć owego podsystemu. Zatem proces modernizacji ma na celu poprawę parametrów użytkowych obiektu w stosunku do dotychczasowych wartości, więc w przypadku drogi kolejowej inwestycje modernizacyjne sprowadzają się do wykonania robót, mających na celu uzyskanie podwyższonych (założonych w projekcie) parametrów techniczno-eksploatacyjnych, poprzez zmianę układu geometrycznego toru, w połączeniu z możliwością wymiany podstawowych elementów konstrukcyjnych [1,11,12].

W wyniku modernizacji następuje przesunięcie osi toru, a w zależności od wielkości tego przesunięcia możemy mówić o regulacji lub przebudowie układu torowego [9,10]. Wartości przesunięć na długości linii mają również istotne znaczenie z uwagi na zakres robót ziemnych, a tym samym na koszty przebudowy danej linii. Z racji tego rozwiązaniem problemu jest taki wariant, w którym wartości przesunięć osi toru pozwolą zachować

istniejących układ budowli ziemnych (nasypy, skarpy wykopów) bez konieczności ich przebudowywania [5-7].

W opisanych w niniejszej pracy algorytmach obliczeniowych, służących do wyznaczania przesunięć osi toru położonego w łuku parabolicznym przyjęto założenie zachowania kąta zwrotu trasy układu istniejącego i projektowanego. Ponadto algorytm ten umożliwia przeprojektowanie łuku parabolicznego na typowy układ łuku kołowego z symetrycznymi krzywymi przejściowymi (parabola trzeciego stopnia) poprzez wygenerowanie odpowiednich wartości przesunięć. W dalszym ciągu jednak nowy układ geometryczny opisany jest zbiorem współrzędnych prostokątnych w lokalnym układzie odniesienia.

Do przeprowadzania obliczeń użyto programu komputerowego MUGO (akronim od Modernizacja Układów Geometrycznych tOru), w którym zaimplementowano algorytmy obliczające przesunięcia typowych układów łuków poziomych [8,13-15].

1. CHARAKTERYSTYKA STOSOWANYCH MODELII

W celu obliczenia wartości przesunięć osi toru projektowanego układu geometrycznego względem istniejącego, układy zostały podzielone na strefy, które związane są z punktami głównymi łuku (początek, środek i koniec) oraz krzywych przejściowych (początek i koniec). Takie podejście pozwala na uproszczenie obliczeń i wyodrębnienie (dla tego szczególnego przypadku) czterech różnych algorytmów, nazwanych modelami.

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiony został podział na strefy i odpowiadające im modele dla układów geometrycznych składających się z łuku parabolicznego i łuku kołowego z symetrycznymi krzywymi przejściowymi [6,7]. Istniejący łuk paraboliczny opisany został punktami A,E (odpowiednio początek i koniec łuku), krzywe przejściowe punktami A,B i D,E (odpowiednio początek i koniec krzywej przejściowej). Projektowany układ został opisany przez punkty 0,K (krzywa przejściowa), K,L (łuk kołowy) i N,M (krzywa przejściowa). Początek układu współrzędnych znajduje się w punkcie 0 (tj. w początku projektowanej krzywej przejściowej), a oś odciętych jest styczną dwóch układów geometrycznych.

Obliczenia przesunięć projektowanej osi toru względem układu istniejącego wykonywane są według następujących modeli:

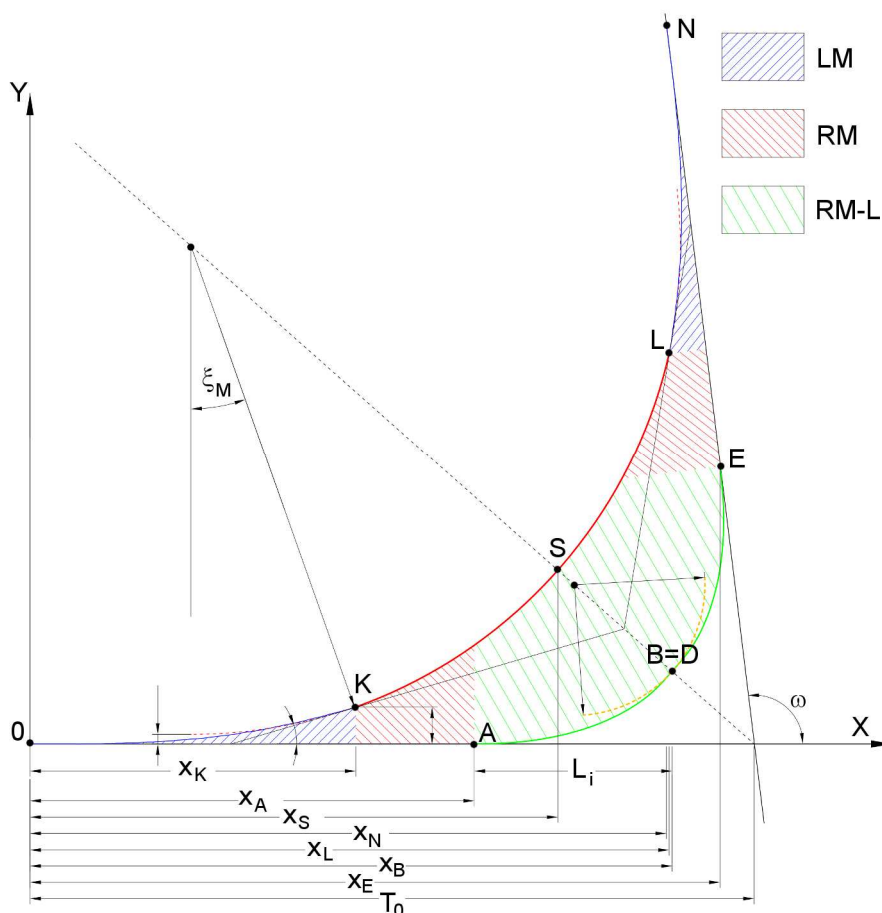
- LM - nazwany od długości projektowanej krzywej przejściowej LM. Obejmuje obliczenia przesunięć od punktu początkowego 0 do punktu A lub końca projektowanej krzywej przejściowej (punkt K). Na rysunku 1 model LM ma zastosowanie w przedziale odciętych $(0;x_K>$, w którym obliczane są wartości rzędnych z dowolnym krokiem.
- LM-L – obejmuje strefę obliczeń od punktu A (początek istniejącej krzywej przejściowej - L_i) do punktu K (koniec projektowanej krzywej przejściowej - LM), a zatem mieści się w przedziale odciętych $(x_A;x_K>$. Wartość przesunięcia w tym modelu jest różnicą rzędnych krzywej przejściowej projektowanej i istniejącej (Rys.2).
- RM-L – model ten obejmuje strefę obliczeń od punktu K (początek nowego łuku o promieniu RM) do punktu B (koniec istniejącej krzywej przejściowej o długości L_i) i mieści się w przedziale odciętych $(x_K ;x_B>$. Na rysunku 2 przedstawiono strefę obejmującą obliczenia według tego modelu.
- RM – model ten obejmuje strefę od punktu K (początek łuku projektowanego) do punktu A (początek łuku istniejącego) w przedziale odciętych $(x_K;x_A>$ (Rys.1) . Moduł ten pozwala obliczyć przesunięcie osi projektowanego łuku o promieniu RM względem stycznej.

Przedstawione modele do obliczania przesunięć osi toru projektowanego układu geometrycznego względem układu istniejącego, pozwalają na analizę wariantów modernizacji

trasy i wybór najlepszego rozwiązania. W zależności od rodzaju istniejącego układu geometrycznego, a w szczególności długości krzywych przejściowych i promienia łuku stosowane są wybrane modele obliczeniowe. Proces doboru modeli odbywa się automatycznie w opracowanym programie, co znacznie skraca czas obliczeń i pozwala na analizowanie większej liczby rozwiązań dopuszczalnych.

Dobór modeli i algorytmy obliczeniowe dla układów, w których wydłużono krzywą przejściową i zwiększono promień łuku został przedstawiony w pracach [6,7], a zastosowanie programu MUGO dla tych przypadków w pracach [13-15].

W przypadku modernizacji łuków koszowych bez krzywych przejściowych do układu geometrycznego składającego się z łuku kołowego i symetrycznych krzywych przejściowych mogą wystąpić modele LM, RM, LM-R, RM-R, opis tego przypadku został przedstawiony w pracy [8].



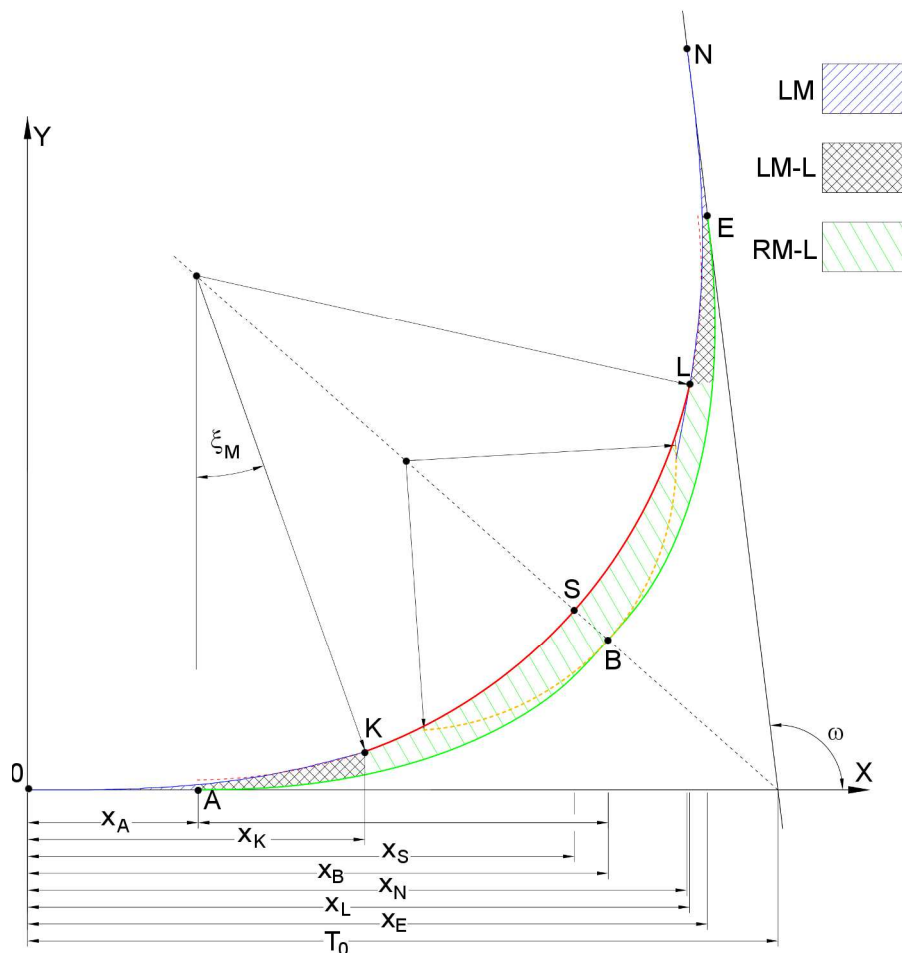
Rys. 1. Schemat istniejącego łuku parabolicznego i projektowanego łuku z krzywymi przejściowymi - Wariant 1

Źródło: Opracowanie własne

2. PRZYPADK ŁUKU KOŁOWEGO Z SYMETRYCZNYMI KRZYWYMI

Opracowany algorytm dotyczy istniejącego układu geometrycznego w postaci łuku parabolicznego złożonego z dwóch krzywych przejściowych o długości L_i i promienia R . Modernizację takiego układu (poprzez zwiększenie prędkości) można uzyskać projektując w tym miejscu nowy łuk kołowy o promieniu R_M z symetrycznymi krzywymi przejściowymi o długości L_M . Do obliczenia przesunięć osi toru wykorzystywane są cztery modele: LM, RM-L, RM, LM-L.

W praktyce obliczenia mogą być wykonane według dwóch wariantów obliczeń. Wariant pierwszy wystąpi wówczas, gdy odcięta punktu K (koniec projektowanej krzywej przejściowej) jest krótsza od odciętej punktu A (początku krzywej istniejącej). Wówczas obliczenia wykonywane zostaną według trzech modeli: LM, RM, RM-L (Rys. 1). Wariant drugi obejmuje przypadki, gdy odcięta punktu K jest dłuższa od odciętej punktu A. Wówczas obliczenia wykonywane zostaną według modeli: LM, LM-L, RM-L (Rys. 2).



Rys. 2. Schemat istniejącego łuku parabolicznego i projektowanego łuku z krzywymi przejściowymi - Wariant 2

Źródło: Opracowanie własne

W pierwszej kolejności należy obliczyć wartości odciętych, od których zależy podział układu geometrycznego na strefy obliczeniowe, gdzie zastosowane zostaną odpowiednie modele.

Wartość odciętej w punkcie A (odcinek OA) można obliczyć z zależności (Rys.2):

$$x_A = T_{0M} - T_{0ip} \quad (1)$$

gdzie:

T_{0M} – długość stycznej układu projektowanego,

T_{0ip} – długość stycznej układu istniejącego.

Styczną główną układu projektowanego T_{0M} opisuje zależność:

$$T_{0M} = L_M - R_M \sin \xi_M + (R_M + n_M) \tan \frac{\omega}{2} \quad (2)$$

gdzie:

R_M - promień projektowanego łuku [m],

n_M - przesunięcie łuku do wewnątrz [m],

ξ_M - kąt nachylenia stycznej do krzywej $\xi_M = \arctan \frac{L_M}{2R_M}$,

ω - kąt zwrotu trasy [°].

Przesunięcie łuku do wewnątrz obliczamy z wyrażenie:

$$n_M = y_{kM} - R_M (1 - \cos \xi_M) \quad (3)$$

gdzie:

y_{kM} - rzędna końca krzywej przejściowej $y_{kM} = \frac{L_M^2}{6R_M}$,

L_M - długość projektowanej krzywej przejściowej.

Styczną główną istniejącego łuku parabolicznego można wyznaczyć za pomocą wyrażenia:

$$T_{0ip} = R \tan \frac{\omega}{2} + n \tan \frac{\omega}{2} + L_i - R \sin \frac{\omega}{2} \quad (4)$$

gdzie:

R - promień łuku parabolicznego [m],

L_i - długość istniejącej krzywej przejściowej [m].

Odcięta punktu K (końca projektowanej krzywej przejściowej) wyznacza się z zależności:

$$x_K = L_M \quad (5)$$

W opisywanym przypadku występuje symetria układu. Przesunięcia osi toru są więc obliczane do punktu S, który wyznacza środek łuku o promieniu R_M . Odcięta punktu S wyznaczana jest za pomocą wyrażenia:

$$x_S = \frac{L_M}{2} + \frac{\pi R_M \omega}{360} \quad (6)$$

3. PRZYPADEK ŁUKU PARABOLICZNEGO

W przypadku istniejącego układu geometrycznego, w którym występuje łuk paraboliczny o promieniu R z krzywymi przejściowymi o długości L_i , modernizacja może zostać wykonana poprzez zaprojektowanie nowego łuku parabolicznego o promieniu R_M z krzywymi przejściowymi o długości L_M .

Do obliczeń przesunięć osi toru projektowanego układu względem układu istniejącego wykorzystuje się dwa modele: LM, LM-L (Rys. 3).

Wartość odciętej punktu A (odcinek OA) wyznaczana jest z zależności (Rys.3) :

$$x_A = T_{0Mp} - T_{0ip} \quad (7)$$

gdzie:

T_{0Mp} – długość stycznej układu projektowanego (łuk paraboliczny),

T_{0ip} – długość stycznej układu istniejącego wyznaczana z zależności (4).

Styczną główną projektowanego łuku parabolicznego można wyznaczyć za pomocą wyrażenia:

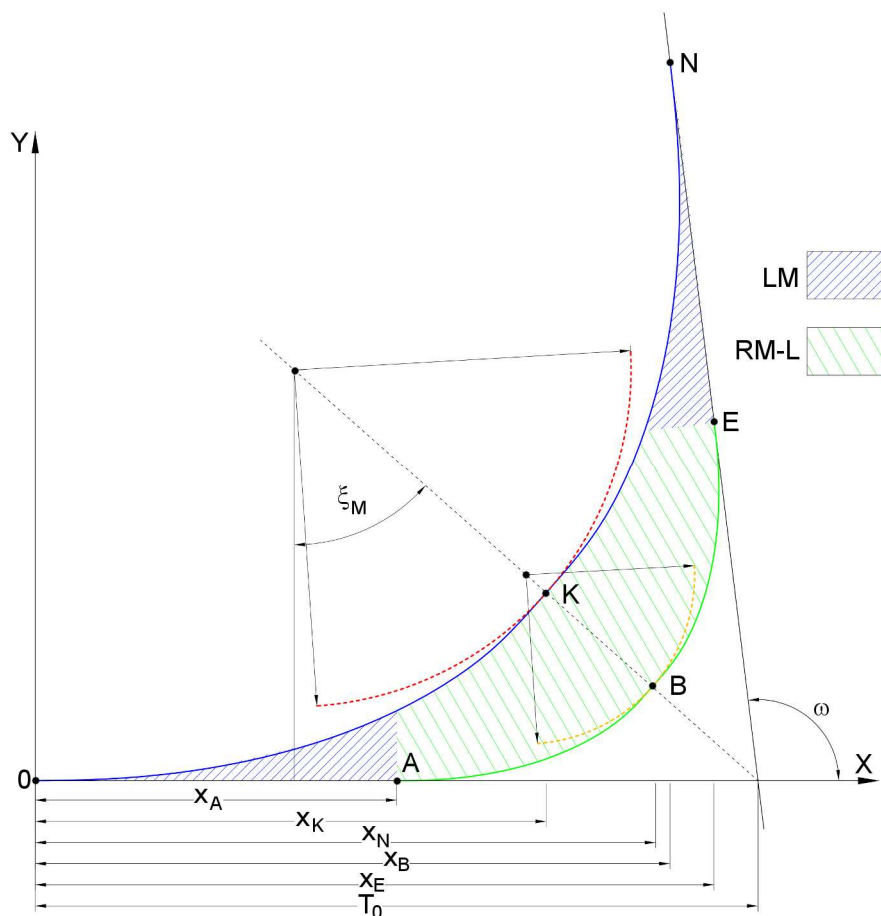
$$T_{0Mp} = R_M \tan \frac{\omega}{2} + n_M \tan \frac{\omega}{2} + L_M - R_M \sin \frac{\omega}{2} \quad (8)$$

gdzie:

R_M - promień projektowanego łuku parabolicznego [m],

L_M - długość projektowanej krzywej przejściowej [m].

Długość odciętej x_K (końca krzywej przejściowej) wyznaczana jest z zależności (5), natomiast długość odciętej x_S z wyrażenia (6).



Rys. 3. Schemat istniejącego łuku parabolicznego i projektowanego łuku parabolicznego

Źródło: Opracowanie własne

4. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA PROGRAMU MUGO

Istniejący układ geometryczny to łuk paraboliczny o długości krzywych przejściowych $L=129,436$ m, promieniu $R=800$ m i kącie zwrotu trasy $\omega=9,25^\circ$, gdzie maksymalna prędkość jazdy pociągów wynosi $V=120$ km/h.

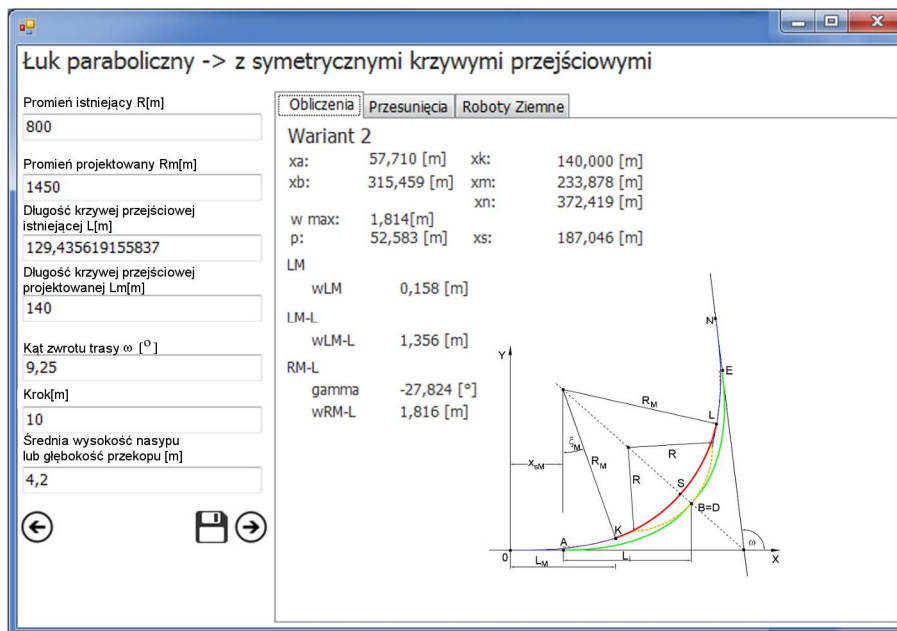
Zaprojektowane zostały trzy nowe układy geometryczne składające się z łuku kołowego o promieniu R_M z symetrycznymi krzywymi przejściowymi o długości L_M (Tabela 1).

Tab. 4. Parametry układów geometrycznych i maksymalne przesunięcie osi toru

Nr układu	R_M [m]	L_M [m]	V_{max} [km/h]	w_{max} [m]
I	1450	140	160	1,816
II	1700	180	170	2,861
III	3000	140	170	6,587

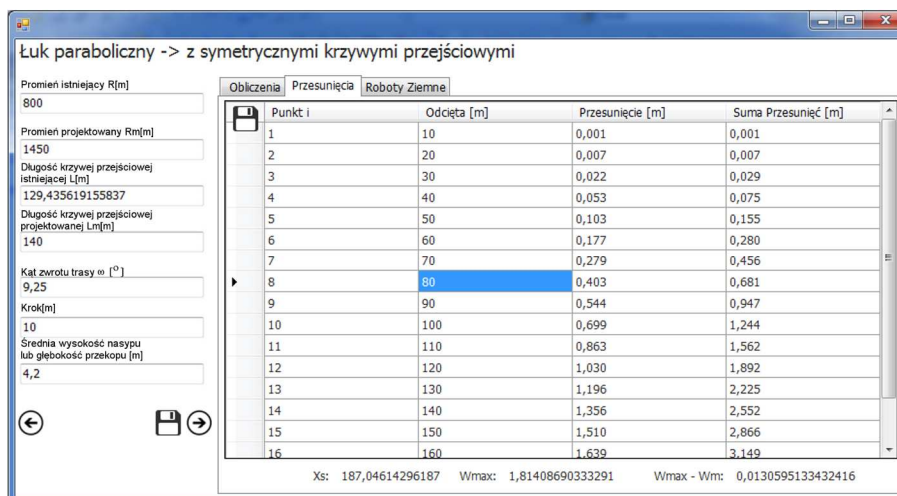
Źródło: Opracowanie własne

Do obliczeń przesunięcia osi toru projektowanego układu geometrycznego względem układu istniejącego wykorzystano program komputerowy MUGO. Po uruchomieniu aplikacji użytkownik wybiera opcje modernizacji układu geometrycznego i wprowadza dane (Rys.4). Program oblicza wartości przesunięcia osi toru z wybranym krokiem, a wyniki podawane są w tabelicy (Rys.5).



Rys. 4. Okno wprowadzania danych i obliczeń

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 5. Okno z wartościami przesunięć osi toru

Źródło: Opracowanie własne

Przykład drugi dotyczy istniejącego układu geometrycznego w postaci łuku parabolicznego o długości krzywych przejściowych $L=129,436$ m, promieniu $R=800$ m i kącie zwrotu trasy $\omega=9,25^\circ$, gdzie maksymalna prędkość jazdy pociągów wynosi $V=120$ km/h.

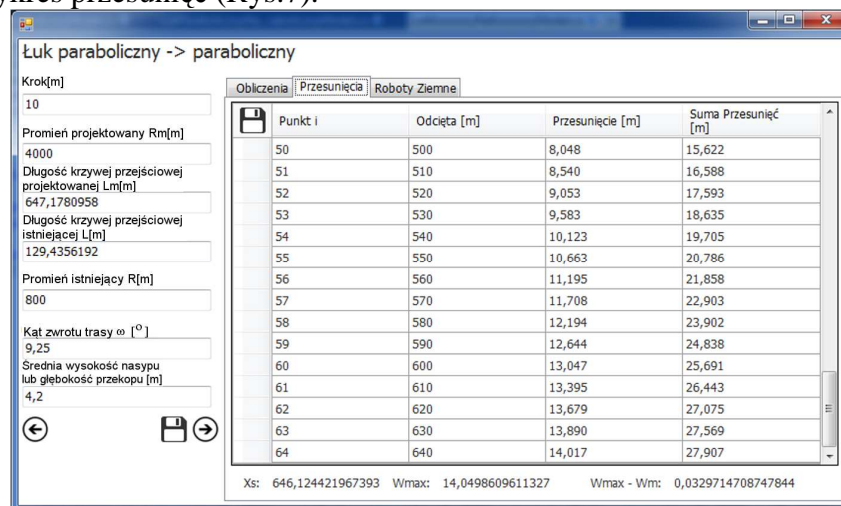
Zaprojektowane zostały dwa nowe układy geometryczne składające się z łuków parabolicznych o promieniu R_M z krzywymi przejściowymi o długości L_M (Tabela 2).

Tab. 2. Parametry układów geometrycznych i maksymalne przesunięcie osi toru

Nr układu	R_M [m]	L_M [m]	V_{max} [km/h]	w_{max} [m]
I	2500	404,486	180	7,464
II	4000	647,178	230	14,049

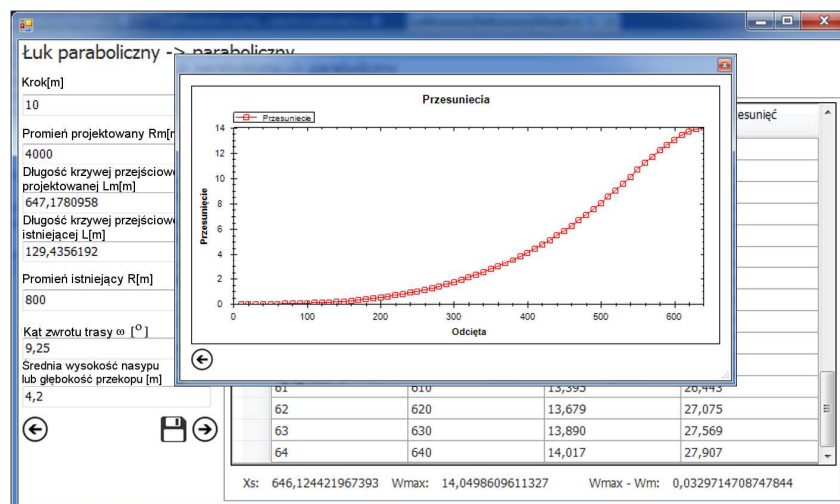
Źródło: Opracowanie własne

Do obliczeń przesunięcia osi toru projektowanego układu geometrycznego względem układu istniejącego wykorzystano program komputerowy MUGO. Po uruchomieniu aplikacji użytkownik wprowadza dane, a obliczone wartości przesunięcia osi toru z wybranym krokiem podawane są w tablicy (Rys.6). Program może również we wszystkich przypadkach wyświetlić wykres przesunięć (Rys.7).



Rys. 6. Okno z wartościami przesunięć osi toru

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 7. Okno z wykresem przesunięć

Źródło: Opracowanie własne

PODSUMOWANIE

Na obecnym etapie prac program komputerowy MUGO pozwala wyznaczyć wartości przesunięć osi toru względem układu istniejącego w postaci łuków parabolicznych, kołowych, koszowych i kołowych z krzywymi przejściowymi.

Obliczone wartości przesunięć pozwalają na analizę możliwości modernizacyjnych rozpatrywanej linii kolejowej a w ramach tej analizy podejmowane będą decyzje o konieczności przeprojektowywania położenia konstrukcji podtorza (nasypów, przekopów).

Dalszy kierunek prac będzie dotyczył optymalizacji projektowanych układów geometrycznych z wykorzystaniem algorytmów genetycznych, z jednoczesnym uwzględnieniem kosztów wykonania przebudowy i eksploatacji (np. zużycia szyn).

BIBLIOGRAFIA

1. Rozporządzenie ministra transportu i gospodarki morskiej z dnia 10 września 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie. (Dz. U. nr 151, poz. 987).
2. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/57/WE z dnia 17 czerwca 2008 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei we Wspólnocie, Czerwiec 2008.
3. European Standard EN 13803-1: Railway applications - track - track alignment design parameters - track gauges 1435 mm and wider-part 1: plain line, November 2009.
4. Decyzja Komisji z dnia 26 kwietnia 2011 r. dotycząca technicznej specyfikacji interoperacyjności podsystemu "infrastruktura" transeuropejskiego systemu kolei konwencjonalnych, Kwiecień 2011.
5. Bałuch. H. *Optymalizacja układów geometrycznych toru*. WKŁ, Warszawa, 1983.
6. Bałuch H., Bałuch M.. *Układy geometryczne toru i ich deformacje*. KOW, Warszawa, 2010.
7. Bałuch M.. *The assessment of changes of track geometrical layout in the process of feasibility studies of railways modernization*. Archives of Civil Engineering, Nr 4,2006.
8. Bałuch M., Szwaczkiewicz K.. *Modernizacja łuków koszowych z wykorzystaniem programu MUGO*. Miesięcznik naukowo-techniczny Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP Przegląd Komunikacyjny, Nr 9-10, 2011.
9. Kędra Z. *Optymalizacja regulacji osi toru kolejowego w płaszczyźnie poziomej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Budownictwo. - 2005, z. 103. - (Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, PL ISSN 0434-0779 ; nr 1694). - Zawiera: XIII Konferencja Naukowo-Techniczna DROGI KOLEJOWE 2005. Wisła, 20-21 października 2005.
10. Kędra Z. *Metody regulacji osi toru*. W: PPM-T: Jubileuszowa Sesja Naukowa Katedry Inżynierii Kolejowej: poświęcona 100-leciu Katedr Kolejowych na Politechnice w Gdańsku oraz pamięci Prof. Dr Inż. Bogumiła Hummła (1875-1956): Gdańsk, 15 kwietnia 2005 r. - Gdańsk, 2005
11. Massel A. *Projektowanie linii i stacji kolejowych*. KOW, Warszawa, 2010.
12. Standardy techniczne. szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości $V_{max} \leq 200$ km/h (dla taboru konwencjonalnego) i 250 km/h (dla taboru z wychylnym pudłem). PKP PLK S.A., Warszawa, 2009.
13. Szwaczkiewicz K.. *Komputerowe wspomaganie zmian modernizowanych układów geometrycznych toru*. IV Konferencja Naukowo-Techniczna "Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym INFRASZYN 2011", 2011.
14. Szwaczkiewicz K. *Komputerowe wspomaganie zmian modernizowanych układów geometrycznych toru kolejowego z wykorzystaniem programu MUGO*. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Inżynieria Lądowa i Wodna (1). Gdańsk, 2012

15. Szwackiewicz K. *Komputerowe wspomaganie modernizacji łuków poziomych na liniach kolejowych*. Technika Transportu Szynowego. - 2012, nr 9, Radom 2012
16. Wielki słownik języka polskiego PAN, red. P. Żmigrodzki, Instytut Języka Polskiego PAN, Kraków, 2007

CALCULATIONS OF AXIS OFFSETS DUE TO MODERNIZATION OF RAILWAY PARABOLIC ARCS

Abstract

One of the major problems in the modernization of the railway lines is to design new geometrical layout that will fulfill assumed conditions. In order to comply with the conditions for the designed layout, the designer usually corrects the basic geometric parameters, i.e. cant, the radius of the arc and the length of transition curves.

The paper presents one of typical geometrical cases on railway lines which is parabolic arc. The methodology of using algorithms that calculate the size of offset of railway axis in this specific case is discussed in detail. Furthermore an example shows the application of the computer program MUGO that calculates the differences between railway axis for the selected solutions.

Autorzy:

mgr inż. **Kamila Szwackiewicz** – Politechnika Gdańska, Katedra Transportu Szynowego