

OBLICZANIE PRZESUNIĘĆ OSI TORU PRZY MODERNIZACJI UKŁADÓW GEOMETRYCZNYCH¹

Kamila Szwackiewicz

Mgr inż., Politechnika Gdańska, Katedra Transportu
Szynowego, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk,
tel.: + 48 58 348 60 90

Zbigniew Kędra

Dr inż., Politechnika Gdańska, Katedra Transportu Szy-
nowego, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, tel.:
+ 48 58 348 60 91

Streszczenie. *Jednym z istotnych problemów przy modernizacji dróg kolejowych jest zaprojektowanie nowych układów geometrycznych torów, które będą spełniały założone parametry eksploatacyjne. Najczęściej jest to związane ze zwiększeniem prędkości jazdy pociągów, co w konsekwencji prowadzi do zmiany promienia łuku kołowego i wydłużenia krzywych przejściowych. W artykule przedstawiono algorytmy obliczeń wielkości przesunięć osi toru kolejowego dla różnych układów geometrycznych. Szczegółowo omówiono przypadek przejścia z łuku kołowego i parabolicznego na łuk kołowy z symetrycznymi krzywymi przejściowymi. Przedstawiono przykład zastosowania programu MUGO do obliczeń przesunięć osi toru dla wybranych rozwiązań.*

Słowa kluczowe: *drogi kolejowe, układy geometryczne torów, modernizacja torów kolejowych*

1. Wprowadzenie

Pojęcie terminu modernizacja (fr. *modernisation*) Słownik Języka Polskiego [16] definiuje jako proces unowocześniania lub uwspółcześnienia. 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 podsystemu. Modernizacja zatem ma na celu poprawę parametrów użytkowych obiektu w stosunku do dotychczasowych wartości.

W przypadku drogi kolejowej, poprzez inwestycje modernizacyjne rozumie się wykonanie 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].

Głównym zadaniem modernizacji jest zaprojektowanie takiego układu geometrycznego toru, który będzie spełniał założone parametry techniczno-eksploatacyjne,

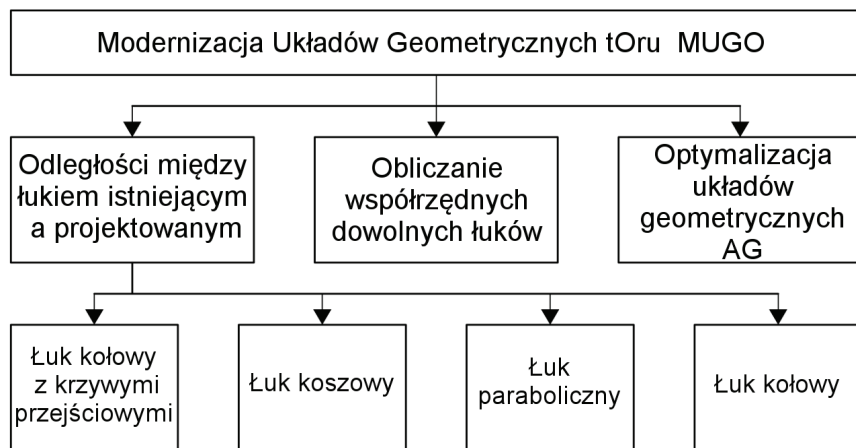
¹ Wkład procentowy poszczególnych autorów: Szwackiewicz K. 75%, Kędra Z. 25%

a w szczególności kryterium maksymalnej prędkości jazdy pociągów. Projekt modernizacji powinien zatem uwzględniać dotychczasowy układ geometryczny toru, stan istniejącej infrastruktury, jak również aspekty ekonomiczne przebudowy [5, 6, 7].

W wyniku modernizacji następuje przesunięcie osi toru, a w zależności od wielkości tego przesunięcia możemy mówić o regulacji lub przebudowie układu torowego [9, 10]. Wartość przesunięcia ma również istotne znaczenie z uwagi na wielkość robót ziemnych, a tym samym koszty przebudowy. Należy poszukiwać takich rozwiązań projektowych, w których wartość przesunięcia osi toru pozwala na zachowanie istniejących nasypów lub przekopów przy założonej zwiększonej prędkości [5, 6, 7].

Na obecnym etapie budowy algorytmów obliczeń przesunięć osi toru przy modernizacji przyjęto dwa podstawowe założenia. Po pierwsze kąt zwrotu trasy dla układu istniejącego i projektowanego jest taki sam, a pomiędzy dwiema stycznymi przebiega łuk kołowy, koszowy lub paraboliczny. Nowy układ geometryczny składa się z łuku kołowego i symetrycznych krzywych przejściowych w postaci paraboli trzeciego stopnia.

Na podstawie przyjętych algorytmów przesunięć osi toru opracowany został program MUGO (akronim od Modernizacja Układów Geometrycznych tOru) wspomagający proces obliczeń, którego podstawowe moduły przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Podstawowe moduły programu MUGO

Na obecnym etapie prac oprogramowano moduł obliczania przesunięcia osi toru między układem istniejącym i projektowanym oraz moduł obliczania współrzędnych dowolnego układu geometrycznego [15]. W pracach [6, 7, 13-15] przedstawione zostały algorytmy obliczeń przesunięć osi toru dla układu geometrycznego składającego się z łuku kołowego i krzywych przejściowych, w którym zaprojektowano wydłużenie krzywych przejściowych i zwiększenie promienia łuku. Projektowanie nowego układu geometrycznego w przypadku układu złożonego z łuków koszowych przedstawia praca [8].

W artykule omówiono algorytmy obliczeń przesunięć osi toru dla układów istniejących w postaci łuków parabolicznych i kołowych.

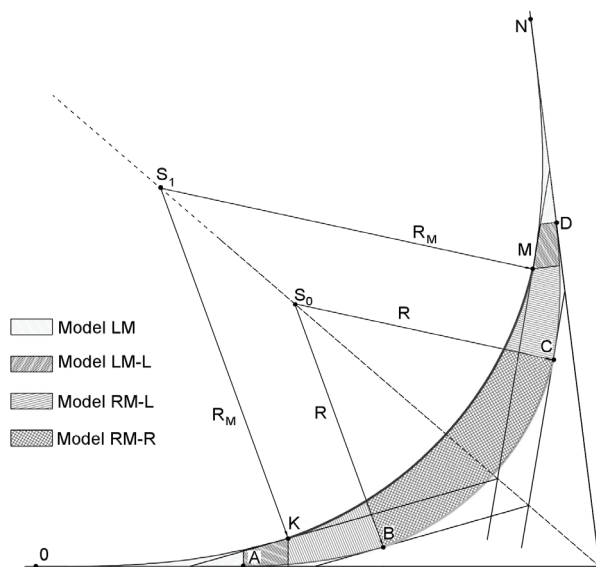
2. Charakterystyka stosowanych modeli

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 sześciu różnych algorytmów, nazwanych modelami.

Na rysunku 2 przedstawiony został podział na strefy i odpowiadające im modele dla układów geometrycznych składających się z łuków kołowych i symetrycznych krzywych przejściowych [6, 7]. Istniejący łuk kołowy opisany został punktami B,C (odpowiednio początek i koniec łuku), a krzywe przejściowe punktami A,B i D,C (odpowiednio początek i koniec krzywej przejściowej). Projektowany układ został opisany przez punkty 0,K (krzywa przejściowa), K,M (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.

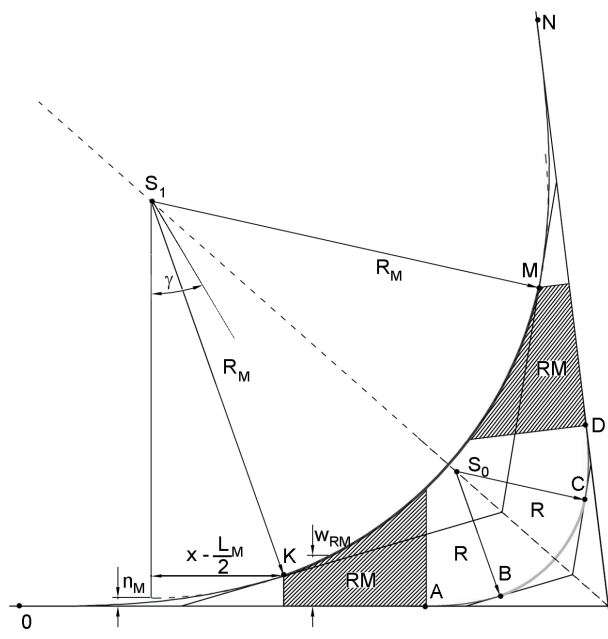
Obliczenia przesunięć projektowanej osi toru względem układu istniejącego wykonywane są według następujących modeli:

LM - nazwany od długości projektowanej krzywej przejściowej L_M . Obejmuje obliczenia przesunięć od punktu początkowego 0 do punktu A lub końca projektowanej krzywej przejściowej (punkt K). Na rysunku 2 model LM ma zastosowanie w przedziale odciętych $(0; x_A >$, w którym obliczane są wartości rzędnych z dowolnym krokiem.

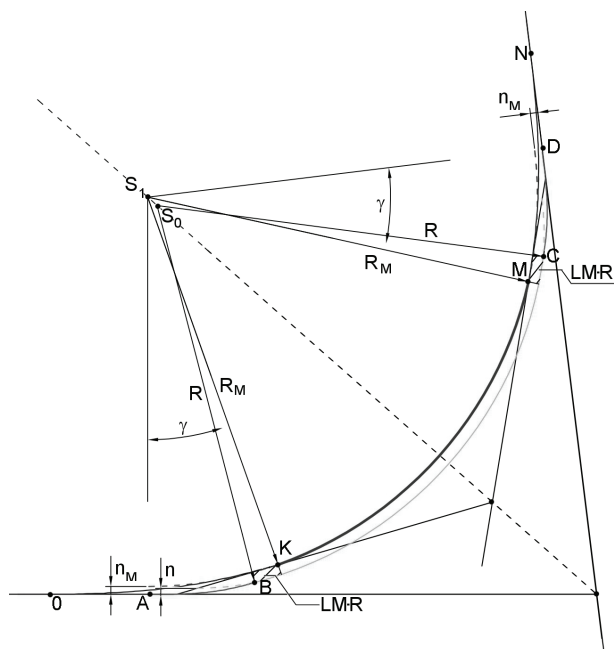


Rys. 2. Podział układu geometrycznego na strefy i odpowiadające im modele

- LM-L – obejmuje strefę obliczeń od punktu A (początek istniejącej krzywej przejściowej - L) do punktu K (koniec projektowanej krzywej przejściowej – L_M), 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 R_M) do punktu B (koniec istniejącej krzywej przejściowej o długości L) i mieści się w przedziale odciętych $(x_K; x_B >$. Na rysunku 2 przedstawiono strefę obejmującą obliczenia według tego modelu.
- RM-R – obejmuje strefę od punktu B (początek istniejącego łuku) do środka łuków kołowych (rys. 2). Obliczenia przesunięć nowego łuku o promieniu R_M względem łuku istniejącego o promieniu R są wyznaczone wzdłuż istniejącego promienia łuku, w przedziale odciętych $(x_B; x_S >$.
- RM – wykorzystywany jest przy modernizacji łuków kołowych (rys. 3) i koszowych, a obejmuje strefę od punktu K (początek łuku projektowanego) do punktu A (początek łuku istniejącego) w przedziale odciętych $(x_K; x_A >$. Moduł ten pozwala obliczyć przesunięcie osi projektowanego łuku o promieniu R_M względem stycznej.
- LM-R – stosowany przy obliczeniach przesunięć projektowanej krzywej przejściowej o długości L_M względem istniejącego łuku kołowego o promieniu R (rys. 4) w przedziale odciętych $(x_B; x_K >$.



Rys. 3. Strefa obliczeń w modelu RM



Rys. 4. Strefa obliczeń w modelu LM-R

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 koszących bez krzywych przejściowych do układu geometrycznego składającego się z łuku kołowego i symetrycznych krzywych przejściowych mogą wystąpić modele LM, RM, LM-R, RM-R, a rozwiązanie tego przypadku zostało przedstawione w pracy [8].

3. Łuk paraboliczny

Opracowany algorytm dotyczy istniejącego układu geometrycznego w postaci łuku parabolicznego złożonego z dwóch krzywych przejściowych o długości L i promienia R . Modernizację takiego układu (poprzez zwiększenie prędkości) moż-

na 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 - przesunięcia projektowanej krzywej przejściowej względem osi odciętych (odcinka toru prostego),

RM-L - przesunięcia projektowanego łuku o promieniu R_M względem istniejącej krzywej przejściowej o długości L ,

RM - przesunięcia projektowanego łuku o promieniu R_M względem osi odciętych,

LM-L - przesunięcia projektowanej krzywej przejściowej L_M względem istniejącej krzywej 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. 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. 5).

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. 5):

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

gdzie:

T_{0M} - długość stycznej układu projektowanego,

T_{0ip} - długość stycznej układu istniejącego.

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

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

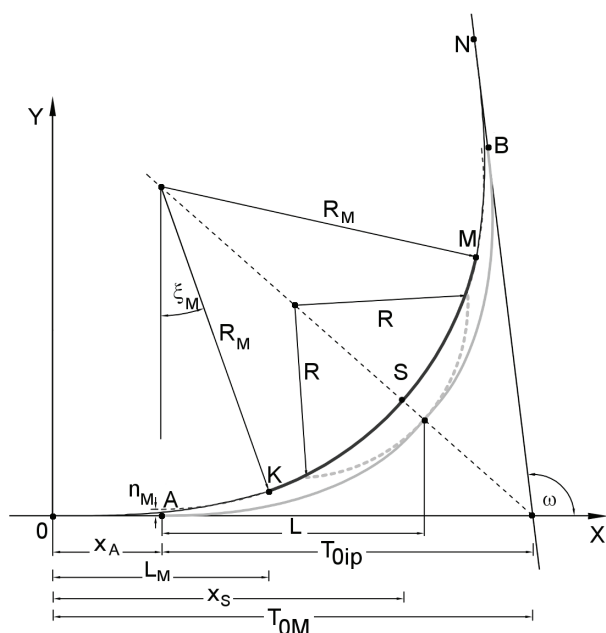
gdzie:

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 [°].



Rys. 5. Schemat istniejącego łuku parabolicznego i projektowanego łuku z krzywymi przejściowymi - Wariant 2

Przesunięcie łuku do wewnątrz obliczamy z wyrażenia:

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

gdzie:

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

L_M - długość projektowanej krzywej przejściowej.

Styczną główną istniejącego łuku parabolicznego można wyznaczyć za pomocą wyrażenia:

$$T_{0ip} = R \tan \frac{\omega}{2} + n \tan \frac{\omega}{2} + L - R \sin \frac{\omega}{2} \tag{4}$$

gdzie:

R - promień łuku parabolicznego [m],

L - długość istniejącej krzywej przejściowej [m].

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

$$x_K = L_M \tag{5}$$

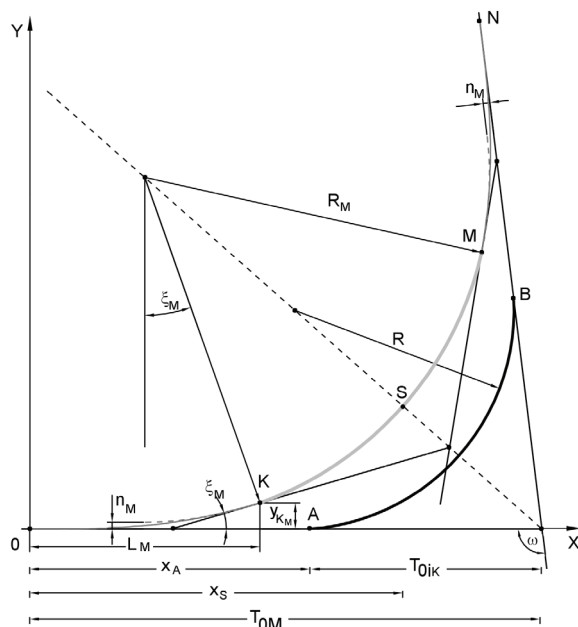
W opisywanym przypadku występuje symetria układu. Przesunięcia osi toru są więc obliczane do punktu S, który wyznacza środek łuku o promieniu R_M . Odcięta punktu S wyznaczana jest za pomocą wyrażenia:

$$x_S = \frac{L_M}{2} + \frac{\pi R_M \omega}{360} \tag{6}$$

4. Łuk kołowy

W przypadku istniejącego układu geometrycznego, w którym występuje tylko łuk kołowy o promieniu R bez krzywych przejściowych, modernizacja będzie wymagała zaprojektowania nowego łuku kołowego o promieniu R_M z symetrycznymi krzywymi przejściowymi o długości L_M .

Do obliczeń przesunięć osi toru projektowanego układu względem układu istniejącego wykorzystuje się cztery modele: LM, LM-R, RM i RMR, a w zależności od położenia punktów A i K mogą wystąpić dwa warianty rozwiązania. Pierwszy z nich będzie miał miejsce, gdy odcięta punktu K (końca projektowanej krzywej przejściowej) jest krótsza od odciętej punktu A (początek łuku kołowego – rys. 6). Wówczas obliczenia wykonywane zostaną według modeli: LM, RM i RM-R. Wariant drugi obejmuje przypadki, gdy odcięta punktu K jest dłuższa od odciętej punktu A, a obliczenia wykonywane będą według modeli: LM, LM-R i RM-R.



Rys. 6. Schemat istniejącego łuku kołowego i projektowanego łuku kołowego z krzywymi przejściowymi - Wariant 1

Wartość odciętej punktu A (odcinek OA) wyznaczana jest z zależności (rys. 6):

$$x_A = T_{0M} - T_{0ik} \quad (7)$$

gdzie:

T_{0M} - styczna układu projektowanego opisana wyrażeniem (2),

T_{0ik} - styczna istniejącego łuku kołowego [m].

Długość stycznej istniejącego łuku kołowego można wyznaczyć korzystając z zależności:

$$T_{0_{ik}} = R \tan \frac{\omega}{2} \quad (8)$$

gdzie:

R - promień istniejącego łuku kołowego [m],

w - kąt zwrotu trasy [°].

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

5. Przykład zastosowania programu MUGO

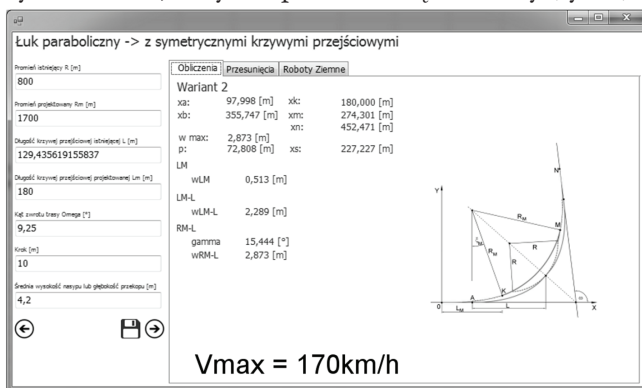
Istniejący układ geometryczny to łuk paraboliczny o długości krzywych przejściowych $L = 129,436$ m, promieniu $R = 800$ m i kącie zwrotu trasy $\omega = 9,25^\circ$, gdzie maksymalna prędkość jazdy pociągów wynosi $V = 120$ km/h.

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).

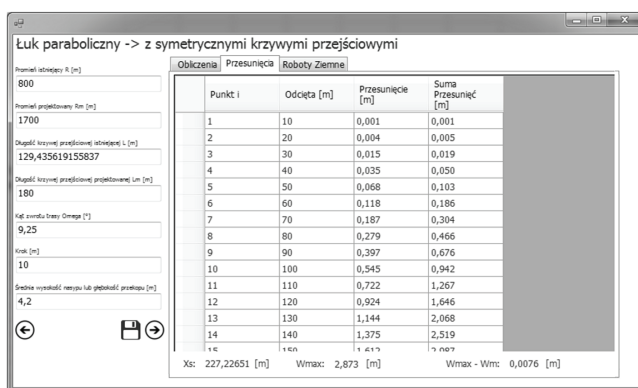
Tabela 1. Parametry nowych układów geometrycznych i maksymalne przesunięcie osi toru

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

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. 7). Program oblicza wartości przesunięcia osi toru z wybranym krokiem, a wyniki podawane są w tablicy (rys. 8).



Rys. 7. Okno wprowadzania danych i obliczeń



Rys. 8. Okno z wartościami przesunięć osi toru

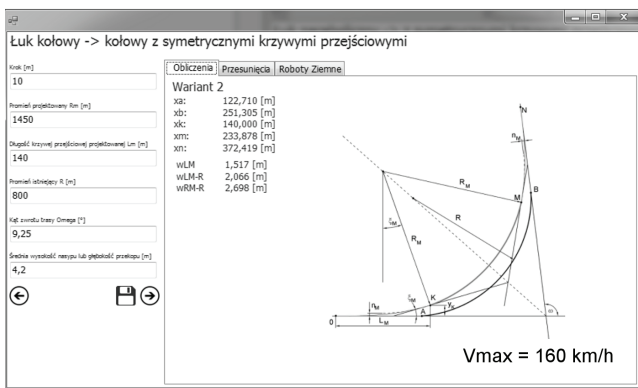
Przykład drugi dotyczy istniejącego układu geometrycznego w postaci łuku kołowego o promieniu $R = 800$ m i kącie zwrotu trasy $\omega = 9,25^\circ$, gdzie maksymalna prędkość jazdy pociągów wynosi $V = 60$ km/h.

Zaprojektowane zostały dwa nowe układy geometryczne składające się z łuku kołowego o promieniu R_M z symetrycznymi krzywymi przejściowymi o długości L_M (tabela 2).

Tabela 2. Parametry nowych układów geometrycznych i maksymalne przesunięcie osi toru

Nr układu	R_M [m]	L_M [m]	V_{max} [km/h]	w_{max} [m]
I	950	100	120	0,938
II	1450	140	160	2,698

Do obliczeń przesunięcia osi toru projektowanego układu geometrycznego względem układu istniejącego wykorzystano program komputerowy MUGO. Po uruchomieniu aplikacji użytkownik wprowadza dane (rys. 9), a obliczone wartości przesunięcia osi toru z wybranym krokiem podawane są w tabelicy (rys. 10).



Rys. 9. Okno wprowadzania danych i obliczeń

Punkt i	Odcięta [m]	Przesunięcie [m]	Suma Przesunięć [m]
1	10	0,001	0,001
2	20	0,007	0,007
3	30	0,022	0,029
4	40	0,053	0,075
5	50	0,103	0,155
6	60	0,177	0,280
7	70	0,282	0,459
8	80	0,420	0,702
9	90	0,599	1,019
10	100	0,821	1,420
11	110	1,093	1,914
12	120	1,419	2,511
13	130	1,771	3,189
14	140	2,066	3,837

Rys. 10. Okno z wartościami przesunięć osi toru

6. Wnioski

Na obecnym etapie prac program MUGO pozwala wyznaczyć wartości przesunięć osi toru względem układu istniejącego w postaci łuków kołowych, parabolicznych, 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 budowie 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 kosзовych z wykorzystaniem programu MUGO. 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. Wiśła, 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 Hummla (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] Szwaczkiewicz K., Komputerowe wspomaganie modernizacji łuków poziomych na liniach kolejowych. Technika Transportu Szynowego, nr 9, Radom 2012.
- [16] Wielki słownik języka polskiego PAN, red. P. Źmigrodzki, Instytut Języka Polskiego PAN, Kraków 2007.