

Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

METODA WIELOKRYTERIALNEJ OCENY
PRZEBUDOWY UKŁADÓW TOROWYCH
NA SZLAKACH

Autor:
mgr inż. KAMILA SZWACZKIEWICZ

Promotor:
prof. dr hab. inż. Władysław Koc

Promotor pomocniczy:
dr inż. Zbigniew Kędra

*Pragnę serdecznie podziękować wszystkim tym osobom,
bez których praca ta nie mogłaby powstać.*

*Promotorowi prof. dr hab. inż. Władysławowi Kocowi
za wszelką pomoc i cenne uwagi.*

*Promotorowi pomocniczemu dr inż. Zbigniewowi Kędrze
za poświęcony czas, cierpliwość i wsparcie.*

*Pani Profesor Marii Bałuch za współpracę
i pomysł tematu rozprawy.*

Pracę dedykuję mojemu Mężowi i Dzieciom.

Streszczenie

Rozprawa doktorska dotyczy zagadnienia projektowania układów geometrycznych toru kolejowego w procesie modernizacji linii kolejowych. Scharakteryzowano główne cechy dotyczące tej tematyki w oparciu o literaturę polską i zagraniczną, w tym przepisy branżowe. Przedstawiono czynniki wpływające na projektowanie modernizacji linii kolejowych. Określono wartości dopuszczalne parametrów kinematycznych i geometrycznych. Specyfika omawianego zagadnienia wymagała opracowania metody optymalizacji wielokryterialnej, za pomocą której tworzone są i oceniane warianty projektowanych układów geometrycznych toru.

Algorytm optymalizacyjny w głównej mierze opiera się na algorytmach genetycznych, dostosowanych do wymagań stawianych przy projektowaniu nowych linii kolejowych.

W pracy wybrano trzy główne kryteria, na podstawie których zbudowano funkcję celu. Pierwszym kryterium była minimalizacja zakresu robót ziemnych. Opracowano algorytmy do wyznaczania ich objętości. Drugim kryterium była minimalizacja kosztu cyklu życia szyn w łukach. Wartość całkowitego kosztu została określona w oparciu o dostępne badania szyn, przepisy, standardy oraz normy. Ostatnim kryterium była maksymalizacja prędkości możliwej do uzyskania podczas przejazdu na zaprojektowanym układzie geometrycznym. Każdemu z rozpatrywanych kryteriów nadano wagi, które określono na drodze wielokrotnych analiz.

Po opracowaniu metody wielokryterialnej oceny zaimplementowano ją do autorskiego programu komputerowego. W części projektowej pracy przeanalizowano różne istniejące układy geometryczne toru i porównano układy zaprojektowane metodami bez wykorzystania optymalizacji z tymi, które zostały wygenerowane w oparciu o stworzoną metodę.

Summary

The doctoral dissertation deals with the problem of rail track geometrical layout designing in the railway line upgrading process. The main features considering this subject were characterised due to the Polish and foreign literature, including industry standards. The factors influencing on railway upgrading designing were described. The limit values of kinematic and geometrical parameters were defined. The specific nature of this issue required to develop a multi-criteria optimization method. Thus, it should generate and assess new variants of geometrical layouts.

Optimization algorithm was mainly based on genetic algorithm adapted to the requirements of new railway lines designing.

The study concerned three main criteria that were the basis of the fitness function. The first criterion was to minimize the scope of the earthworks. The algorithms to determine the volume were specified. The second criterion was to minimize the life cycle cost of rails in curves. The value of the total cost has been determined on the basis of available analyzes, regulations, standards and technical specifications. The final criterion was to maximize the value of velocity that was possible to achieve in the mentioned layout. Each of the considered criteria was analyzed to find the value of its importance.

The developed multi-criteria assesment method was then implemented into to the own computer software. In the designing part of the dissertation, the various existing layouts were analysed and compared with the new ones either without the use of optimization methods or with those that were generated basing on the created method.

Spis treści

Wykaz skrótów i oznaczeń	6
Charakterystyka problemu	13
Wprowadzenie	13
Cel i zakres pracy	13
Rozdział 1. Problematyka projektowania układów geometrycznych toru kolejowego	16
1.1. Projektowanie układów geometrycznych	16
1.1.1. Krzywe przejściowe z prostoliniową rampą przechyłkową	18
1.1.2. Krzywe przejściowe z krzywoliniową rampą przechyłkową	20
1.2. Modernizacja linii kolejowej a projektowanie układów geometrycznych	22
1.3. Modernizacja w świetle przepisów	22
1.4. Określenie wartości granicznych	24
Rozdział 2. Algorytmy optymalizacyjne	33
2.1. Algorytmy metaheurystyczne	34
2.2. Wybór metody optymalizacji	36
2.3. Charakterystyka algorytmu genetycznego	37
2.4. Opis układu geometrycznego, budowa osobnika	42
2.5. Kodowanie osobnika do GA	43
2.6. Określenie funkcji celu	45
Rozdział 3. Problem kosztu cyklu życia szyn w łukach	47
3.1. Czynniki wpływające na zjawisko zużycia szyn	47
3.2. Ruchu pojazdu szynowego po łuku	48
3.3. Wpływ przechyłki na zjawisko zużycia bocznego szyn kolejowych	49
3.4. Ocena kosztu cyklu życia LCC	53
3.5. LCC w świetle przepisów	54
3.6. Definicja trwałości szyn kolejowych	56
3.7. Dobór szyn w zależności od promienia łuku	59
Rozdział 4. Algorytmy przesunięć osi toru	63
4.1. Charakterystyka zastosowanych modeli	65
4.1.1. Model LM	65
4.1.2. Model RM	68
4.1.3. Model RM-L	68
4.1.4. Model LM-L	68
4.1.5. Model LM-R	69
4.1.6. Model RM-R	70
4.2. Łuk kołowy z krzywymi przejściowymi	71
4.3. Łuk kołowy bez krzywych przejściowych	73
4.4. Łuk paraboliczny	77

4.5. Łuk koszowy	82
4.5.1. Charakterystyka zastosowanych modeli	84
Rozdział 5. Obliczenia robót ziemnych	104
5.1. Przyjęte założenia	104
5.2. Obliczanie powierzchni przekroju poprzecznego nasypu	105
5.3. Obliczanie powierzchni przekroju poprzecznego przekopu	110
5.4. Obliczanie pola przekroju poprzecznego na zboczu terenowym	113
5.5. Obliczenie objętości robót ziemnych	116
Rozdział 6. Budowa modelu GA	118
6.1. Generowanie populacji	118
6.2. Reprodukacja	119
6.3. Operatory genetyczne	123
6.4. Sukcesja i zakończenie obliczeń	124
Rozdział 7. Oprogramowanie metody	126
7.1. Wybór platformy oprogramowania	127
7.2. Architektura programu MUGO	127
7.3. Obsługa programu MUGO	130
7.3.1. Moduł optymalizacyjny	130
7.3.2. Moduł obliczeń szczegółowych	132
Rozdział 8. Określenie korzyści z projektowanej przebudowy układu – weryfikacja metody na wybranych przykładach	134
8.1. Metoda weryfikacji	134
8.2. Określenie danych wejściowych	135
8.3. Pierwszy przykład obliczeniowy	135
8.4. Drugi przykład obliczeniowy	138
8.5. Trzeci przykład obliczeniowy	142
8.6. Czwarty przykład obliczeniowy	144
8.7. Piąty przykład obliczeniowy	147
8.8. Podsumowanie weryfikacji	151
Zakończenie	152
Bibliografia	154

Wykaz skrótów i oznaczeń

0	punkt oznaczający początek krzywej przejściowej projektowanej,
A	punkt oznaczający początek krzywej przejściowej istniejącej,
a	przyspieszenie niezrównoważone w m/s^2 ,
A^2	współczynnik proporcjonalności klotoidy,
ACO	algorytmy mrówkowe – <i>ant colony optimization</i> ,
a_{dop}	dopuszczalne niezrównoważone przyspieszenie boczne (odśrodkowe) w m/s^2 ,
$a_{N_{ld}}$	współczynnik kierunkowy prostej regresji w m ,
$a_{N_{lj}}$	współczynnik kierunkowy prostej regresji w m ,
$a_{P_{ld}}$	współczynnik kierunkowy prostej regresji w m ,
$a_{P_{lj}}$	współczynnik kierunkowy prostej regresji w m ,
a_t	dopuszczalna wartość niezrównoważonego przyspieszenia dośrodkowego w m/s^2 ,
A_z	odporność szyn na zużycie w funkcji obciążenia w Tg/mm ,
$a_{Z_{tld}}$	współczynnik kierunkowy prostej regresji w m ,
$a_{Z_{tlj}}$	współczynnik kierunkowy prostej regresji w m ,
B	punkt oznaczający koniec istniejącej krzywej przejściowej, początek istniejącego łuku kołowego,
$b_{N_{ld}}$	współczynnik prostej regresji w m^2 ,
$b_{N_{lj}}$	współczynnik prostej regresji w m^2 ,
$b_{P_{ld}}$	współczynnik prostej regresji w m^2 ,
$b_{P_{lj}}$	współczynnik prostej regresji w m^2 ,
B_z	obciążenie eksploatacyjne sieci w $Tg \cdot km/rok$,
$b_{Z_{tld}}$	współczynnik prostej regresji w m^2 ,
$b_{Z_{tlj}}$	współczynnik prostej regresji w m^2 ,
C	punkt oznaczający koniec pierwszego istniejącego łuku kołowego, początek drugiego istniejącego łuku kołowego (dotyczy łuków kosztowych),
C_h	współczynnik wynoszący $C = 11,8 \text{ mm} \cdot \text{m} \cdot \text{h}^2/\text{km}^2$,
c_z	funkcja zależna od konstrukcji nawierzchni,
D	punkt oznaczający koniec drugiego istniejącego łuku kołowego, koniec drugiej istniejącej krzywej przejściowej,
dz	dopuszczalne zużycie szyny w mm ,
dz_{45°	dopuszczalne zużycie boczne 45° szyny w mm ,
dz_p	dopuszczalne zużycie pionowe główki szyny w mm ,
E	punkt oznaczający początek drugiej istniejącej krzywej przejściowej,
f	prędkość podnoszenia się koła na rampie przechyłkowej w mm/s ,

F_d	siła dośrodkowa w N ,
f_{dop}	dopuszczalna prędkość podnoszenia koła po rampie przechyłkowej w mm/s ,
FF	funkcja celu (oceny lub dostosowania) – <i>fitness function</i> ,
f_i	funkcja przystosowania danego i -tego osobnika,
F_r	siła na styku obręczy koła i bocznej powierzchni główki szyny w toku wewnętrznym w N ,
g	przyspieszenie ziemskie $g = 9,81$ w m/s^2 ,
GA	algorytmy genetyczne – <i>genetic algorithms</i> ,
H	wysokość istniejącego nasypu lub głębokość istniejącego przekopu w m ,
h	wartość przechyłki na łuku kołowym w (lub różnica przechyłek w łukach, pomiędzy którymi wykonuje się rampę przechyłkową) mm ,
h^+	nadmiar przechyłki w mm ,
h^-	niedobór przechyłki w mm ,
H_g	wysokość graniastosłupa w m ,
h_M	projektowana przechyłka w mm ,
h_{max}	maksymalna wartość przechyłki w mm ,
h_{max}^+	maksymalny nadmiar przechyłki w mm ,
h_{max}^-	maksymalny niedobór przechyłki w mm ,
h_{min}	minimalna wartość przechyłki w mm ,
h_{teor}	przechyłka teoretyczna (przy której nie występuje niezrównoważone przyspieszenie) w mm ,
h_{zakM}	projektowana przechyłka zakodowana w algorytmie genetycznym,
$h_{zakBinM}$	projektowana przechyłka zakodowana binarnie w algorytmie genetycznym,
$H_{wi_{ld}}$	wysokość nasypu (głębokość przekopu) na linii dwutorowej w zależności od wartości przesunięcia w m ,
$H_{wi_{lj}}$	wysokość nasypu (głębokość przekopu) na linii jednotorowej w zależności od wartości przesunięcia w m ,
i	pochylenie poprzeczne terenu w $\%$,
ILS	iteracyjne przeszukiwanie lokalne – <i>iterated local search</i> ,
i_{pod}	pochylenie podłużne terenu w $\%$,
K	punkt oznaczający koniec krzywej przejściowej, początek łuku kołowego,
K_z	współczynnik wyrażający jakość szyn,
K_{0z}	współczynnik wyrażający jakość technologii produkcji szyn,
k	długość odcinka kołowego łuku w m ,
k_1	długość odcinka kołowego pierwszego łuku w m ,
K_{1z}	współczynnik zależny od składu chemicznego stali,
K_{inw}	koszty inwestycji,
$K_{inwestycyjny}$	koszty inwestycyjne,
km	łączna długość toru włącznie z rozjazdami w km ,
$K_{likwidacji}$	koszty likwidacji,
k_{min}	minimalna długość łuku kołowego w m ,
$K_{operacyjne}$	koszty operacyjne,
$K_{posiadania}$	koszty posiadania,

KR	argumenty (kryteria) funkcji celu,
k_{sz}	koszt szlifowania szyn w $zł/m$,
K_{szlif}	roczny koszt szlifowania w $zł/m$,
K_{utr}	roczny koszt utrzymania toru w $zł/m$,
$K_{utrzymania}$	koszty utrzymania,
$K_{uzyskania}$	koszty uzyskania,
k_w	koszt wymiany szyn w $zł/m$,
k_{wsz}	liczba pojedynczych wymian szyn na 1 km toru,
K_{wym}	roczny koszt wymiany szyn w $zł/m$,
k_z	współczynnik względnej sztywności podłoża i szyny,
L	punkt oznaczający koniec pierwszego projektowanego łuku kołowego, początek drugiego projektowanego łuku kołowego (dotyczy łuków kosztowych),
L_0	długość krzywej przejściowej mierzona po rzucie jej stycznej w m ,
l	długość krzywej przejściowej mierzona po jej długości w m ,
L_{min}^{ψ}	minimalna długość krzywej przejściowej z uwagi na dopuszczalną wartość przyrostu przyspieszenia w m ,
LCC	koszt cyklu życia – <i>life cycle cost</i> ,
LCC_{szyn}	koszt cyklu życia szyn kolejowych,
L_{min}^f	minimalna długość krzywej przejściowej z uwagi na dopuszczalną wartość prędkości podnoszenia się koła na rampie przechyłkowej w m ,
L_i	długość istniejącej krzywej przejściowej w m ,
L_{kw}	wartość graniczna długości części kołowej łuku k_{min} bądź też wstawki prostej w_{min} w m ,
L_M	długość projektowanej krzywej przejściowej w m ,
L_{min}	minimalna długość krzywej przejściowej w m ,
L_{min}^n	minimalna długość krzywej przejściowej z uwagi na dokładność tyczenia w m ,
L_{zakM}	długość projektowanej krzywej przejściowej zakodowana w algorytmie genetycznym,
$L_{zakBinM}$	długość projektowanej krzywej przejściowej zakodowana binarnie w algorytmie genetycznym,
M	punkt oznaczający koniec drugiego projektowanego łuku kołowego, koniec drugiej projektowanej krzywej przejściowej,
m	masa pojazdu,
N	punkt oznaczający początek drugiej projektowanej krzywej przejściowej,
n	przesunięcie łuku istniejącego do wewnątrz w m ,
n_{GA}	określa liczba genów w chromosomie,
n_M	przesunięcie łuku projektowanego do wewnątrz w m ,
n_{min}	minimalne przesunięcie łuku kołowego do wewnątrz w m ,
n_{sz}	liczba szlifowań w ciągu roku,
n_w	liczba wymian szyn w ciągu roku,
n_{wa}	częstotliwość wymian szyn na łuku w $1/rok$,
Obj_g	objętość graniastosłupa w m^3 ,
P	pole powierzchni przekroju poprzecznego nasypu/przekopu w m^2 ;

p	wielkość pomocnicza do wyznaczania stref modeli obliczeniowych,
$P_{N_{ld}}$	pole przekroju poprzecznego nasypu na przykładowej linii dwutorowej w m^2 ,
$P_{N_{lj}}$	pole przekroju poprzecznego nasypu na linii jednotorowej w m^2 ,
$P_{N_{lj1}}$	pole przekroju poprzecznego nasypu na linii jednotorowej dla pierwszego przypadku obliczeniowego w m^2 ,
$P_{N_{lj2}}$	pole przekroju poprzecznego nasypu na linii jednotorowej dla drugiego przypadku obliczeniowego w m^2 ,
$P_{N_{lj3}}$	pole przekroju poprzecznego nasypu na przykładowej linii jednotorowej dla trzeciego przypadku obliczeniowego w m^2 ,
p_i	prawdopodobieństwo selekcji danego i -tego osobnika,
P_k	statyczny nacisk koła na szynę w kN ,
P_{Pg}	pole podstawy graniastosłupa w m^2 ,
$P_{P_{ld}}$	pole przekroju poprzecznego przekopu dla przyjętej linii dwutorowej w m^2 ,
$P_{P_{lj}}$	pole przekroju poprzecznego przekopu dla przyjętej linii jednotorowej w m^2 ,
PSO	algorytm roju cząstek – <i>particle swarm optimization</i> ,
$P_{Z_{t_{ld}}}$	pole przekroju poprzecznego nasypu/przekopu na przykładowej linii dwutorowej w m^2 ,
$P_{Z_{t_{lj}}}$	pole przekroju poprzecznego nasypu/przekopu na przykładowej linii jednotorowej w m^2 ,
Q	przeniesione obciążenie w ciągu roku w Tg/rok ,
q	masa metra bieżącego szyny,
Q_p^{gr}	graniczne obciążenie szyn między wymianami w Tg ,
Q_{sz}^{gr}	obciążenie pomiędzy prewencyjnymi szlifowaniami w Tg ,
R	promień łuku kołowego (istniejącego) w m ,
r	dowolnie przyjęte zaokrąglenie,
R_1	promień pierwszej części istniejącego łuku koszowego w m ,
R_2	promień drugiej części istniejącego łuku koszowego w m ,
R_3	promień pierwszej części projektowanego łuku koszowego w m ,
R_4	promień drugiej części projektowanego łuku koszowego w m ,
r_k	promień koła w cm ,
R_M	projektowany promień łuku kołowego w m ,
RZ	objętość robót ziemnych w m^3 ,
R_{ZakM}	projektowany promień łuku zakodowany w algorytmie genetycznym,
$R_{ZakBinM}$	projektowany promień łuku zakodowany binarnie w algorytmie genetycznym,
s	rozstaw osi toków szynowych w mm ,
S	punkt oznaczający środek łuku kołowego,
SA	symulowane wyżarzanie – <i>simulated annealing</i> ,
SS	przeszukiwanie rozproszone – <i>scatter search</i> ,
s_t	szerokość toru w mm ,
T	trwałość szyny,
t	czas w s ,
T_0	długość stycznnej głównej układu w m ,

T_{0M2}	druga styczna główna projektowanego łuku koszowego w m ,
T_{0M}	długość stycznej głównej projektowanego łuku w m ,
T_{0ik}	styczna główna istniejącego łuku kołowego w m ,
T_{0ip}	styczna główna istniejącego łuku parabolicznego w m ,
t_1	styczna pierwszej części istniejącego łuku koszowego w m ,
t_2	styczna drugiej części istniejącego łuku koszowego w m ,
t_3	styczna pierwszej części projektowanego łuku koszowego w m ,
t_4	styczna drugiej części projektowanego łuku koszowego w m ,
t_e	maksymalny czas eksploatacji szyny w rok,
T_m	trwałość średnia szyn,
T_μ	trwałość nominalna szyn,
TS	przeszukiwanie tabu – <i>tabu search</i> ,
$UNIFE$	Stowarzyszenie europejskiego przemysłu kolejowego – <i>Union des Industries Ferroviaires Européennes</i> ,
U_z	moduł sprężystości nawierzchni,
V_{kr}	prędkość możliwa do osiągnięcia dla danego układu geometrycznego w km/h ,
$V^{l,\psi}$	maksymalna możliwa do zastosowania prędkość na krzywej przejściowej z uwagi na prędkość przyrostu przyspieszenia w km/h ,
$V^{l,f}$	maksymalna możliwa do zastosowania prędkość na krzywej przejściowej z uwagi na prędkość podnoszenia koła na rampie przechyłkowej w km/h ,
VNS	zmiennie przeszukiwanie sąsiedztwa – <i>variable neighbourhood search</i> ,
V_{max}	maksymalna prędkość pojazdów kolejowych bez systemu kompensacji przyspieszeń odśrodkowych km/h ,
V_{maxM}	prędkość możliwa do osiągnięcia dla danego projektowanego układu geometrycznego w km/h ,
V_{min}	prędkość minimalna w km/h ,
V_p	prędkość pojazdu w km/h ,
V_{max}^R	prędkość maksymalna na łuku z uwagi na jego promień w km/h ,
V_t	uśredniona prędkość najwolniejszych, kursujących regularnie pojazdów kolejowych w km/h ,
V_{teor}	teoretyczna stała wartość prędkości w km/h ,
w	wartość przesunięcia układu projektowanego względem istniejącego w m ,
w_j	przelicznik ujednocajający wartości jednostek,
w_{LCC}	waga dotycząca kosztu cyklu życia szyn,
w_{LM}	przesunięcie osi toru dla modelu obliczeniowego LM w m ,
w_{LM_2}	przesunięcie osi toru dla modelu obliczeniowego LM_2 w m ,
w_{LM-L}	przesunięcie osi toru dla modelu obliczeniowego $LM-L$ w m ,
w_{LM_2-R}	przesunięcie osi toru dla modelu obliczeniowego LM_2-R w m ,
$w_{LM_2-R_2}$	przesunięcie osi toru dla modelu obliczeniowego LM_2-R_2 w m ,
w_{LM-R}	przesunięcie osi toru dla modelu obliczeniowego $LM-R$ w m ,
w_{LM-R_2}	przesunięcie osi toru dla modelu obliczeniowego $LM-R_2$ w m ,
w_{min}	minimalna długość wstawki prostej w m ,
w_{obj}	waga dotycząca objętości robót ziemnych,
w_{pred}	waga dotycząca prędkości,

$w_{R_3R_2}$	przesunięcie osi toru dla modelu obliczeniowego R_3R_2 w m ,
w_{R_4}	przesunięcie osi toru dla modelu obliczeniowego R_4 w m ,
$w_{R_4R_2}$	przesunięcie osi toru dla modelu obliczeniowego R_4R_2 w m ,
w_{RM}	przesunięcie osi toru dla modelu obliczeniowego RM w m ,
w_{RM_2}	przesunięcie osi toru dla modelu obliczeniowego RM_2 w m ,
w_{RM-L}	przesunięcie osi toru dla modelu obliczeniowego $RM-L$ w m ,
w_{RM-R}	przesunięcie osi toru dla modelu obliczeniowego $RM-R$ w m ,
w_{RM-R_2}	przesunięcie osi toru dla modelu obliczeniowego $RM-R_2$ w m ,
w_V	waga dotycząca prędkości w - ,
w_y	waga dotycząca przesunięcia w - ,
x	odcięta,
x_1	odległość od końca stycznej pierwszego projektowanego łuku do końca stycznej projektowanego łuku koszowego w m ,
x_A	odcięta punktu A w m ,
x_B	odcięta punktu B w m ,
x_C	odcięta punktu C w m ,
x_D	odcięta punktu D w m ,
x_E	odcięta punktu E w m ,
x_K	odcięta punktu K w m ,
x_L	odcięta punktu L w m ,
x_M	odcięta punktu M w m ,
x_N	odcięta punktu N w m ,
x, y	współrzędne prostokątne,
y	rzędna,
y_F	rzędna punktu F w m ,
y_G	rzędna punktu G w m ,
$y_{istn} - y_{proj}$	maksymalne odległości pomiędzy układem istniejącym i projektowanym w m ,
y_k	rzędna końca krzywej przejściowej istniejącej w m ,
y_{k_M}	rzędna końca krzywej przejściowej projektowanej w m ,
y_{LM}	rzędna na krzywej przejściowej projektowanej w m ,
y_{LM_2}	rzędna drugiej projektowanej krzywej przejściowej w m ,
y_R	rzędna pierwszego łuku kołowego R_1 w istniejącym łuku koszowym w m ,
y_{R_2}	rzędna drugiego łuku kołowego R_2 w istniejącym łuku koszowym w m ,
y_{R_3}	rzędna pierwszego projektowanego łuku kołowego R_3 w m ,
y_{R_4}	rzędna drugiego projektowanego łuku kołowego R_4 w m ,
y_{UT}	różnica rzędnych punktów U i T w m ,
y_{VD}	różnica rzędnych punktów V i D w m ,
z	zużycie szyny w ciągu roku w mm ,
z_{45°	wartość zużycia bocznego 45° po przeniesieniu obciążenia 100 Tg w mm ,
α	kąt promienia wodzącego R_M w $^\circ$,
α_1	kąt promienia wodzącego R_1 w $^\circ$,
α_μ	wartość stała charakteryzująca dany typ szyny,
β	kąt istniejącego promienia wodzącego R w $^\circ$,
β_μ	wartość stała charakteryzująca dany typ szyny,

β_T	współczynnik $\beta_T = 0,95$,
β_z	starta powierzchnia w przekroju poprzecznym główki w mm^2 ,
γ	kąt zwrotu pierwszego łuku kołowego w łuku koszowym w $^\circ$,
γ_μ	wartość stała charakteryzująca dany typ szyny,
Δl_{odc}	długość rozpatrywanych odcinków (krok obliczeniowy) w m ,
δ	kąt zwrotu drugiego łuku kołowego w łuku koszowym w $^\circ$,
δs	poszerzenie toru w mm ,
δ_z	względny poślizg koła po szynie w $\%$,
ε	kąt promienia wodzącego R_M w $^\circ$,
ζ	współczynnik równania funkcji celu; wartość współczynnika powyżej 1 zmniejsza wartość zakresu robót ziemnych, poniżej 1 ją zwiększa,
η	współczynnik równania funkcji celu; wartość współczynnika powyżej 1 zmniejsza wartość kosztu cyklu życia, poniżej 1 ją zwiększa,
θ	współczynnik równania funkcji celu; wartość współczynnika powyżej 1 zwiększa znaczenie prędkości, poniżej 1 je zmniejsza,
κ	współczynnik korygujący rzędne krzywej przejściowej w $^\circ$,
λ	funkcja uwzględniająca krzywizny linii kolejowej,
μ	prawdopodobieństwo trwałości szyn,
ξ	kąt nachylenia stycznej do krzywej łuku (istniejącego) w $^\circ$,
ξ_M	kąt nachylenia stycznej do krzywej łuku projektowanego w $^\circ$,
σ	kąt promienia wodzącego R_2 w $^\circ$,
τ	kąt zwrotu stycznej poprowadzony do kłotoidy w tym punkcie w $^\circ$,
φ	kąt nachylenia toru do poziomu w $^\circ$,
ψ	przyrost przyspieszenia w m/s^3 ,
ψ_{dop}	dopuszczalna wartość przyrostu przyspieszenia w m/s^3 ,
ω	kąt zwrotu trasy w $^\circ$,

Charakterystyka problemu

Wprowadzenie

Jednym z ważniejszych wyzwań, przed którym obecnie stoi zarządca polskich dróg kolejowych, jest utrzymanie i poprawa stanu technicznego i geometrycznego torów. Wydłużone czasy przejazdów wynikające z procesu degradacji jakości torów niewątpliwie prowadzą do spadku zainteresowania koleją przez podróżnych. W takiej sytuacji należy rozważyć wyłączenie tych linii z eksploatacji bądź przeprowadzenie ich gruntownej odbudowy. Przed rozpoczęciem prac związanych z przywróceniem pierwotnego stanu toru wykonywane są analizy dotyczące możliwości podwyższenia parametrów techniczno–eksploatacyjnych. Licznie prowadzone obecnie w Polsce inwestycje modernizacyjne mają za zadanie doprowadzić do zwiększenia prędkości jazdy, a z punktu widzenia pasażera – do skrócenia czasu podróży. W tym celu wykonuje się prace związane ze zmianą układu geometrycznego oraz wymianą elementów konstrukcyjnych nawierzchni i podtorza. W aktualnie opracowywanych studiach wykonalności przy tworzeniu wariantów największą wagę przypisuje się minimalizacji kosztów wykonania przedsięwzięcia. Jednak pominięcie bądź niewłaściwe oszacowanie wpływu pozostałych kryteriów może skutkować ograniczeniem potencjału modernizacyjnego linii na przyszłość. Czynnikiem wpływającym na stopień złożoności procesu modernizacyjnego jest znaczna liczba kryteriów mających wpływ na jakość wariantu oraz brak dedykowanych narzędzi umożliwiających analizę wielokryterialną, dostosowanych do potrzeb projektów modernizacji układów torowych.

Cel i zakres pracy

W pracy przedstawiona została metodyka związana z projektowaniem modernizacji układów geometrycznych linii kolejowych. Przedstawione zostały ogólnie znane i stosowane metody projektowania. Wykorzystanie zebranych informacji wpłynęło na decyzję o włączeniu do procesu oceny i projektowania zaawansowanych – na etapie wariantowania – technik optymalizacyjnych oraz komputerowego wspomaganie. Zasadność wyboru powyższej problematyki wynika z aktualności tego zagadnienia w kontekście realizowanego szerokiego planu modernizacji ważnych linii na sieci PKP. Głównym celem pracy było opracowanie wielokryterialnej metody projektowania i oceny wariantów układów geometrycznych w procesie modernizacji linii kolejowych. W związku z przyjętym do opracowania zagadnieniem sformułowano następującą tezę: *„Stosowanie nowoczesnych algorytmów optymalizacyjnych stanowi efektywną metodę wspomagającą projektowanie i ocenę wariantów w procesie modernizacji linii kolejowych.”*

W pracy zawarto treści o charakterze studialnym i projektowym. Zakres studialny stanowiły następujące zagadnienia:

- przegląd aktualnie stosowanych metod w projektowaniu i ocenie modernizacji linii kolejowych – studium literatury krajowej i zagranicznej;
- analiza przepisów regulujących proces modernizacji w Polsce i w wybranych krajach.

W zakresie teoretycznym ujęto następujące zagadnienia:

- Analizę możliwości wspomagania procesu modernizacji z wykorzystaniem nowoczesnych algorytmów optymalizacyjnych:
 - ◊ opis ważniejszych metod optymalizacyjnych;
 - ◊ analizę czynników mających istotny wpływ na proces projektowania modernizacji.

W części praktycznej skoncentrowano się na:

- stworzeniu założeń odnośnie modelu systemu wspomagania w modernizacji;
- określeniu architektury systemu (opisane zostały wszystkie moduły systemu i zależności między programami);
- stworzeniu aplikacji komputerowej opracowanej na bazie wcześniejszych założeń teoretycznych (program został napisany w języku C#);
- weryfikacji metody na podstawie studium przypadków.

Praca doktorska składa się z ośmiu rozdziałów:

- **Rozdział 1** przedstawia główne metody projektowania układów geometrycznych toru kolejowego oraz określa czynniki wpływające na inwestycję przebudowy układu geometrycznego. Scharakteryzowano parametry geometryczne i kinematyczne występujące na torze w łuku. Określono graniczne wartości parametrów znajdujących się w przepisach krajowych, rozszerzając opis do norm, rozporządzeń i dyrektyw europejskich.
- **Rozdział 2** opisuje ogólnie znane i stosowane algorytmy optymalizacyjne. Scharakteryzowane zostały metaheurystyki przeszukiwań. Dokonano także wyboru metody i dostosowano ją do opracowywanego problemu. Ponadto scharakteryzowano sposób, w jaki wykonywane będą obliczenia. Opracowano funkcję celu.
- **Rozdział 3** przybliży problematykę trwałości szyn w łukach. Opisano czynniki wpływające na zużycia szyn i scharakteryzowano rolę przechyłki w postępowaniu zużyć bocznych. Przedstawiono założenia metody oceny kosztu cyklu życia szyn kolejowych.
- **Rozdział 4** przedstawia algorytmy wyznaczające przesunięcia osi toru dla różnych typów układów geometrycznych, istniejących i projektowanych. Pokazano tu opracowaną metodę zawierającą różne modele obliczeniowe oraz przypadki, dla których mają one zastosowanie. W opracowaniu uwzględniono możliwe istniejące łuki:
 - ◊ łuk kołowy z krzywymi przejściowymi,
 - ◊ łuk kołowy bez krzywych przejściowych,
 - ◊ łuk paraboliczny,
 - ◊ łuk koszowy.

- **Rozdział 5** prezentuje algorytmy do obliczania zakresu robót ziemnych. Stosowane obliczenia były wykonywane dla linii jedno i dwutorowej o różnym ukształtowaniu terenu w profilu podłużnym i poprzecznym. W metodzie kalkulacji uwzględniono wartości odsunięć osi toru wyznaczone według przedstawionych we wcześniejszym rozdziale algorytmów.
- **Rozdział 6** formułuje sposób, w jaki obliczono prędkość maksymalną uwzględnioną w algorytmie optymalizacyjnym jako jeden z czynników wpływających na wybór wariantu modernizacyjnego. Przedstawioną metodę wykorzystano przy wyborze współczynników wag wpływających na wartość wyznaczonej funkcji celu.
- **Rozdział 7** omawia główne założenia związane z implementacją opracowanej metody obliczeniowej do programu komputerowego. Dokonano wyboru platformy oprogramowania i języka, w którym został stworzony program oraz przedstawiono jego architekturę.
- **Rozdział 8** określa korzyści z zastosowania technik wspomagania komputerowego w wybranych przypadkach obliczeniowych. Porównano wyniki jednej z powszechnie stosowanych metod z rezultatami prezentowanymi w programie komputerowym, w którym została zastosowana wielokryterialna metoda optymalizacji.

Rozdział 1

Problematyka projektowania układów geometrycznych toru kolejowego

1.1. Projektowanie układów geometrycznych

Na układ geometryczny w torze kolejowym składają się z następujące podstawowe elementy [109]:

- w planie:
 - odcinki proste toru;
 - odcinki toru usytuowane w łuku kołowym o promieniu $R = const$;
 - odcinki łączące proste z łukiem kołowym o zmiennej krzywiznie, tj. krzywych przejściowych;
 - wstawki proste, czyli krótkie odcinki proste znajdujące się pomiędzy dwoma łukami kołowymi lub krzywymi przejściowymi;
- w przekroju poprzecznym:
 - szerokość toru s_t odległość mierzona pomiędzy główkami szyn 14 mm poniżej ich powierzchni tocznej;
 - przechyłka toru h różnica wysokości toków szynowych;
 - poszerzenie toru δs ;
- w przekroju podłużnym:
 - odcinki toru o jednostajnym pochyleniu przedstawianym w jednostce promila;
 - łuki wyokrąglające załomy profilu.

W celu zapewnienia płynnego przejścia między prostym odcinkiem toru i łukiem kołowym projektowane są krzywe przejściowe. Taki odcinek toru powinien zabezpieczyć przed gwałtownym przyspieszeniem odśrodkowym występującym przy przejeździe pojazdu na styku prostej i łuku kołowego. Podwyższenie toku szynowego powinno również zmieniać się płynnie na długości krzywej przejściowej do wartości przechyłka na łuku kołowym. W tym celu konstruowana jest rampa przechyłkowa. Krzywa przejściowa i rampa przechyłkowa powinny być ze sobą ściśle powiązane, tak aby zmiana krzywizny i odpowiadająca jej przechyłka następowały w sposób ciągły i płynny (czyli przy spełnieniu warunków brzegowych przedstawionych w tabeli 1.1).

Warunki te można również określić jako konieczne(1-4) i pożądane (5-6) [16]. Aby przestrzenna krzywa przejściowa spełniała wszystkie 6 warunków brzegowych, w żadnym ze swych rzutów nie może być linią prostą. Niemniej jednak, krzywe przejściowe z prostoliniową rampą przechyłkową spełniają warunki konieczne i są powszechnie stosowane w Polsce i za granicą. Ponadto, z uwagi na sztywność szyn, teoretyczne załomy na ich początku i końcu nie będą występowały [16, 109]. Przykładem takiej krzywej jest najczęściej stosowana w kraju parabola 3-ego stopnia, nazywana również parabolą sześcienną. Istnieje jednak wiele ciągłych funkcji

L.p.	Wielkość	Punkt na krzywej przejściowej	
		Początek krzywej pkp	Koniec krzywej kkp
1	y	0	y_0
2	$\frac{dy}{dx} = \xi_0$	0	ξ
3	$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{R(x)}$	0	$\frac{1}{R_0}$
4	$z = A \cdot k_0$	0	h_0
5	$\frac{dh}{dx} = A \frac{dk}{dx} = A \frac{d^3y}{dx^3}$	0	0
6	$\frac{d^2z}{dx^2} = A \frac{d^2k}{dx^2} = \frac{d^4y}{dx^4}$	0	0

Tab. 1.1. Warunki brzegowe umożliwiające płynny przejazd pociągu [109]

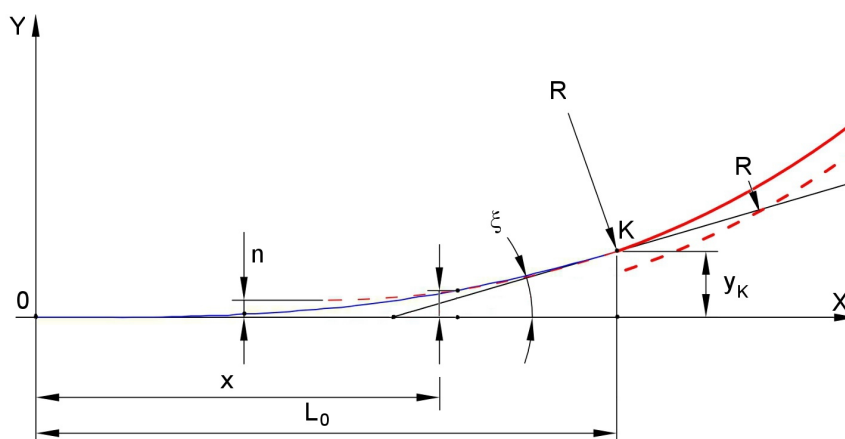
monotonicznych spełniających wszystkie założone warunki [109]. Mimo że w przepisach kolejowych dopuszcza się stosowanie krzywych przejściowych z krzywoliniowymi rampami przechyłkowymi, nie są one wbudowywane na polskich liniach kolejowych. Potrzeba ich stosowania jest poddawana ciągłej dyskusji. W literaturze często opisuje się liczne ich wady, takie jak skomplikowanie obliczeń, utrudnione wykonawstwo i utrzymanie. Zauważono również, że w środkowej części krzywej występuje większa wichrowatość toru [16]. Niemniej jednak, przy wsparciu odpowiedniego oprogramowania komputerowego i postępie w technologii wykonania i utrzymania toru, przesłanki te nie powinny ograniczać stosowania tego typu krzywych. Jak zauważa prof. Koc [65], problem tkwi raczej w przyzwyczajeniu projektantów i wykonawców do stosowania krzywych przejściowych o prostoliniowych rampach przechyłkowych i niechęci do zdobywania nowego zakresu wiedzy.

Krzywe przejściowe, z uwagi na kształt rampy przechyłkowej, można podzielić na dwie zasadnicze grupy [16, 65]:

- z prostoliniową rampą przechyłkową,
- z krzywoliniowymi rampami przechyłkowymi.

1.1.1. Krzywe przejściowe z prostoliniową rampą przechyłkową

Metoda uproszczona



Rys. 1.1. Parabola sześcienna

Krzywą przejściową najczęściej stosowaną w Polsce jest parabola trzeciego stopnia o prostoliniowej rampie przechyłkowej (tzw. parabola sześcienna). Postać krzywej opisywana jest równaniem:

$$y = \frac{x^3}{6 \cdot R \cdot L_0} \quad (1.1)$$

gdzie:

- x, y współrzędne prostokątne,
- R promień łuku kołowego w m ,
- L_0 długość krzywej przejściowej mierzona po rzucie jej stycznej w m .

Tangens kąta stycznej na końcu krzywej przejściowej ξ jest wyrażony poprzez pochodną $\frac{dy}{dx}$, stąd:

$$\xi = \arctg \frac{L_0}{2R} \quad (1.2)$$

Przy stosowaniu metody uproszczonej należy zdawać sobie sprawę z pewnych przybliżeń przyjętych przy jej obliczaniu [65]:

- rzut środka łuku przesuniętego nie pokrywa się ze środkiem krzywej przejściowej,
- warunek zgodności stycznych w miejscu połączenia krzywej z łukiem nie jest spełniony.

Z tych właśnie powodów zostało stworzonych wiele metod korygujących rzędne krzywej przejściowej. Jedną z metod znanych w Polsce jest zastosowanie współczynnika korygującego κ przedstawione przez prof. H. Bałucha [16]:

$$\kappa = \frac{1}{\cos \xi} \quad (1.3)$$

i

$$\xi = \arcsin \frac{L_0}{2R} \quad (1.4)$$

Zastosowanie tej metody do skorygowania rzędnych krzywej przejściowej nie jest pozbawione pewnych wad. Przesunięcie całego łuku wraz z krzywymi przejściowymi może powodować trudności z realizacją i stabilizacją układu [86]. Alternatywnym rozwiązaniem, w którym nie wymaga się odsuwania łuku kołowego, jest korygowanie krzywej metodą Helmerta. Parabola trzeciego stopnia opisana została następującym równaniem:

$$y = \frac{x^3}{6RL_0} \cdot \left(1 + \frac{3L_0^2}{64R^2} \right) \quad (1.5)$$

Metody uproszczone mają swoje uzasadnienie. Wynikają niejednokrotnie z długoletniej tradycji projektowania układów geometrycznych. Powstawały na samym początku istnienia kolejnictwa, stąd opis ich kształtu wynikał ze stosowanych formuł matematycznych. W dzisiejszych czasach stosowanie tradycyjnych metod projektowania podyktowane jest wyłącznie łatwym i szybkim wykonaniem obliczeń. Należałoby się jednak zastanowić nad rezygnacją z uproszczeń i stosowaniem metod ścisłych [65].

Klotoida

Innym typem krzywej przejściowej z prostoliniową rampą przechyłkową jest powszechnie stosowana w drogownictwie klotoida. Krzywą tą, można opisać we współrzędnych biegunowych następującym równaniem:

$$L_0 = \frac{A^2}{R} \quad (1.6)$$

gdzie:

A^2 współczynnik proporcjonalności,

Po przekształceniu otrzymuje się równanie naturalne klotoidy, tj. niezależne od układu współrzędnych [54]:

$$L_0 \cdot R = A^2 = \text{const} \quad (1.7)$$

Krzywa ta charakteryzuje się tym, że jej promień krzywizny jest odwrotnie proporcjonalny do długości łuku [109]. Aby przedstawić równanie klotoidy w postaci parametrycznej należy scałkować następujące zależności:

$$dx = \cos \tau \cdot dL_0 \quad (1.8)$$

i

$$dy = \sin \tau \cdot dL_0 \quad (1.9)$$

gdzie:

τ kąt zwrotu stycznej poprowadzony do klotoidy w tym punkcie.

W wyniku rozwinięcia funkcji trygonometrycznych w szereg i scałkowaniu wyrazów otrzymuje się równania parametryczne:

$$x = L_0 - \frac{L_0^5}{40A^2} + \frac{L_0^9}{3456A^8} - \frac{L_0^{13}}{599040A^{12}} + \dots \quad (1.10)$$

i

$$y = \frac{L_0^3}{6A^2} - \frac{L_0^7}{336A^6} + \frac{L_0^{11}}{42240A^{10}} - \frac{L_0^{15}}{9676800A^{14}} + \dots \quad (1.11)$$

Można zauważyć, że przy przyjęciu założenia $x \approx L_0$ parabola 3-go stopnia stanowi pierwszy wyraz szeregu klotoidy [109]:

$$y \approx \frac{L_0^3}{6A^2} \quad (1.12)$$

Jak zaobserwowano, dla dróg kolejowych obie te krzywe są do siebie bardzo zbliżone. Przy obliczaniu dłuższych krzywych przejściowych należy przyjmować więcej wyrazów szeregu lub można posłużyć się zapisem równań w postaci szeregów nieskończonych. Jak sugeruje S. Grodzicki [54], jest to zapis zdecydowanie wygodniejszy w obliczeniach komputerowych.

1.1.2. Krzywe przejściowe z krzywoliniową rampą przechyłkową

Stosowanie krzywych przejściowych gładkich powoduje pewne istotne zmiany w porównaniu do rozwiązań z liniową rampą przechyłkową (np. parabolą 3-go stopnia) [69]. Zastosowanie tych krzywych umożliwia wprowadzenie zwiększonej prędkości pociągów. Literatura wskazuje na celowość stosowania tego typu rozwiązań w warunkach polskich, ale – jak już wcześniej wspomniano – rzadko są one realizowane.

W pracy omówiono cztery rodzaje najczęściej stosowanych krzywych gładkich. Jak wykazano [69], krzywe te uznano za najbardziej odpowiadające stawianym wymaganiom. Są to:

- parabola czwartego stopnia,
- cosinusoida,
- sinusoida,
- krzywa z rampą przechyłkową w postaci paraboli trzeciego stopnia – krzywa Blossa.

Równanie krzywizny opisującej parabolę 4-go stopnia można przedstawić przy pomocy wyrażień:

$$k(l) = \frac{2l^2}{RL_0^2} \quad dla \quad 0 \leq l \leq \frac{L_0}{2} \quad (1.13)$$

gdzie:

l długość krzywej przejściowej mierzona po jej długości w m.

i

$$k(l) = \frac{1}{R} - \frac{2(L_0 - l)^2}{L_0^2} \quad dla \quad \frac{L_0}{2} \leq l \leq L_0 \quad (1.14)$$

Parabola 4-go stopnia spełnia wszystkie warunki konieczne, jak i pożądane. Należy jednak zaznaczyć, że przy tworzeniu gładkich krzywych przejściowych warunki pożądane są z założenia również warunkami koniecznymi [53]. Rampa przechyłkowa dla tej krzywej przejściowej odpowiada parabolicznej rampie przechyłkowej. Profil podłużny tej rampy określa funkcja:

$$h(l) = h_0 \cdot 2 \frac{l^2}{L_0^2} \quad \text{dla} \quad 0 \leq l \leq \frac{L_0}{2} \quad (1.15)$$

i

$$h(l) = h_0 \left(1 - 2 \frac{(L_0 - l)^2}{L_0^2} \right) \quad \text{dla} \quad \frac{L_0}{2} \leq l \leq L_0 \quad (1.16)$$

Równanie krzywizny krzywej przejściowej w postaci sinusoidy można przedstawić następująco:

$$k(l) = \frac{1}{R} \left(\frac{l}{L_0} - \frac{1}{2\pi} \sin 2\pi \frac{l}{L_0} \right) \quad (1.17)$$

Rzędna rampy przechyłkowej wyznacza się z równania:

$$h(l) = h_0 \left(\frac{l}{L_0} - \frac{1}{2\pi} \sin \pi \frac{l}{L_0} \right) \quad (1.18)$$

Krzywizna opisująca krzywą przejściową w postaci cosinusoidy wynosi:

$$k(l) = \frac{1}{2R} \left(1 - \cos \pi \frac{l}{L_0} \right) \quad (1.19)$$

Rzędna rampy przechyłkowej jest opisana zależnością:

$$h(l) = \frac{h_0}{2} \left(1 - \cos \pi \frac{l}{L_0} \right) \quad (1.20)$$

Równanie opisujące krzywiznę dla krzywej przejściowej Blossa można przedstawić następująco:

$$k(l) = \frac{1}{R} \left(\frac{3l^2}{L_0^2} - \frac{2l^3}{L_0^3} \right) \quad (1.21)$$

Rzędna rampy przechyłkowej wynosi:

$$h(l) = h_0 \left(3 \frac{l^2}{L_0^2} - 2 \frac{l^3}{L_0^3} \right) \quad (1.22)$$

Wszystkie z omawianych krzywych przejściowych opisane są równaniem krzywizny. Równania parametryczne tych krzywych można otrzymać poprzez rozwinięcie funkcji trygonometrycznych w szereg i ich całkowanie lub zastosowanie metod numerycznych.

1.2. Modernizacja linii kolejowej a projektowanie układów geometrycznych

Rozwój transportu lądowego wiąże się z koniecznością podwyższania parametrów użytkowych infrastruktury. Rosnące wymagania przewoźników transportujących pasażerów i towary sprawiają, że istotnym zagadnieniem staje się modernizacja linii kolejowych na terenie Polski [110, 121]. Jednym z kluczowych procesów wchodzących w skład tego zagadnienia jest projektowanie nowych układów geometrycznych torów kolejowych [16, 17, 20, 22, 33, 65, 88]. Zatem analiza potrzeb związanych z poprawą parametrów eksploatacyjnych linii kolejowych powinna wskazać te odcinki linii, których aktualne parametry geometryczne nie pozwalają wprowadzić wyższych standardów eksploatacyjnych. Warto podkreślić, że w tego typu sytuacji pomocna może okazać się analiza kryteriów kinematycznych (np. wartości dopuszczalnych przyspieszeń niezrównoważonych), które były stosowane na etapie projektowania danego układu [88]. Niestety, takie podejście nie zawsze pozwala na uzyskanie satysfakcjonujących rezultatów, gdyż już na etapie projektu zostały przyjęte wartości graniczne. Wówczas konieczna jest zmiana układu geometrycznego, która wiąże się z (niejednokrotnie znacznym) przesunięciem osi toru.

Zatem projekt modernizacji powinien polegać na wskazaniu optymalnego położenia osi toru względem przyjętych kryteriów. Głównie wiążą się one z aspektami ekonomicznymi i środowiskowymi. Te pierwsze implikują funkcję celu związaną z minimalizacją dużych przesunięć osi toru (szczególnie w rejonach nasyków kolejowych, obiektów inżynierskich itp.). Drugie zaś wskazują na konieczność uwzględniania wpływu inwestycji na otaczający obszar. Ponadto dalsza analiza układu geometrycznego ma na celu zwiększenie komfortu jazdy pasażerów. Dodatkowym aspektem, na który należy zwrócić uwagę przy kształtowaniu układu geometrycznego, jest współpraca pojazdu szynowego z torem. Modelowanie układów nieliniowych w planie sytuacyjnym (krzywe przejściowe i łuki kołowe) ograniczone jest wówczas kryteriami związanymi z odpowiedzią pojazdu na wymuszenie w postaci zmiennej siły dośrodkowej [131, 132, 136].

W związku z tym tworzonych jest wiele wariantów projektów modernizacji. Istnieje szereg programów stosowanych przy projektowaniu układów geometrycznych toru, np. AutoCad, Civil 3D, Bentley Rail Track, Card, Ferrovia, jak również w modernizacji linii kolejowych: DIMO [20], Railab [130], DYNOC [88]. Kluczowym zadaniem już na etapie planowania (studium wykonalności) jest wstępna ocena proponowanych rozwiązań, które w dalszej kolejności będą uszczegóławiane w etapie projektowania. W związku z tym osoba uczestnicząca w procesie planowania i projektowania powinna dysponować narzędziem umożliwiającym wykonywanie analiz porównawczych.

1.3. Modernizacja w świetle przepisów

Termin modernizacja pochodzi z języka francuskiego *modernisation* i zgodnie z definicją podaną w Słowniku Języka Polskiego [43] oznacza unowocześnianie, uwspółcześnienie. Podobną definicję znaleźć można w *Dyrektywie Parlamentu Europejskiego 2008/57/WE* oraz *Rozporządzeniu Komisji Europejskiej (UE) NR*

1299/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. dotyczącego technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Infrastruktura” systemu kolei w Unii Europejskiej [3, 6]. Według wymienionych dokumentów modernizacja definiowana jest jako „wszelkie większe prace modyfikacyjne prowadzone w podsystemie lub jego części, poprawiające całkowite osiągi podsystemu”. Innymi słowy, modernizacja ma za zadanie poprawić warunki techniczno–eksploatacyjne poprzez odpowiednio wykonane prace ulepszające w danym zakresie uregulowanym przepisami.

Modernizacja obiektu zgodnie z *Rozporządzeniem Ministra* [1] definiowana jest jako „roboty mające na celu przystosowanie budowli kolejowej do wyższych od dotychczasowych parametrów techniczno-eksploatacyjnych”. Możliwe jest wykonanie modernizacji wyłącznie konstrukcji nawierzchni (przykładowo wymiana podkładów drewnianych na strunobetonowe i pozostawienie niezmienionego układu geometrycznego). Poprzez pojęcie modernizacji nawierzchni kolejowej rozumie się wykonywanie robót umożliwiających zmianę warunków użytkowania linii kolejowej i przystosowanie jej do wyższych od dotychczasowych parametrów techniczno–eksploatacyjnych [127]. Modernizację można również wykonać zmieniając sam układ geometryczny, przykładowo poprzez wydłużenie krzywych przejściowych i odtworzenie istniejącej konstrukcji nawierzchni. Natomiast aby poprawić wszystkie parametry użytkowe, najczęściej należy wykonać modernizację obu wymienionych elementów.

Zgodnie z *Instrukcją kolejową Id–1* [127] modernizacja powinna być prowadzona w oparciu o projekt budowlany zgodny z wymogami „Prawa budowlanego” i wykonuje się ją jako:

- inwestycję ulepszającą, która obejmuje roboty podnoszące sprawność techniczną do tej, określonej nowymi parametrami eksploatacyjnymi. Oczekiwany efekt osiąga się poprzez wymianę (na inny typ) podstawowych elementów konstrukcyjnych nawierzchni, czyli:
 - ◊ szyn,
 - ◊ podkładów,
 - ◊ podsypki,
 - ◊ rozjazdów;
- inwestycję modernizacyjną, która obejmuje roboty podwyższające założone w projekcie parametry techniczno–eksploatacyjne poprzez zmianę układu geometrycznego toru, w połączeniu z możliwością wymiany (niezależnie od stanu nawierzchni) jej podstawowych elementów konstrukcyjnych.

Modernizacja i budowa linii powinna odbywać się stosownie do planów zagospodarowania przestrzennego oraz obowiązującego prawa dotyczącego ochrony środowiska, z uwzględnieniem warunków ochrony poszczególnych jego komponentów, to jest: powietrza, klimatu akustycznego, gleb, wód powierzchniowych i podziemnych, przyrody, krajobrazu, dziedzictwa kultury i dóbr materialnych. [106]

Przy kształtowaniu przebiegu trasy nowej lub modernizowanej linii kolejowej należy uwzględniać nie tylko parametry eksploatacyjne, jakie wynikają z aktualnych potrzeb w zakresie przewozów kolejowych na danym obszarze, ale także przewidywane znaczenie danej linii kolejowej w przewozach tranzytowych, ponadregionalnych i międzynarodowych [1].

Zakłada się, że efektem modernizacji będzie stworzenie układu zapewniającego zwiększenie prędkości [32] do wartości zgodnej z zakładanym typem linii kolejowej [106] i odpowiadającej określonej profilowi prędkości. Należy zwrócić również uwagę na warunki eksploatacyjne występujące na danej linii, ponieważ mogą one przyczyniać się do ograniczenia prędkości (np. prowadzenie ruchu towarowego) [65]. Sposób kształtowania profilu prędkości szczegółowo opisany jest w *Standardach technicznych* [106]. Zgodnie z wymienionymi przepisami projektowanie profilu prędkości na modernizowanych liniach wymaga uwzględnienia następujących elementów:

- prędkości maksymalnej pociągów pasażerskich i towarowych,
- prędkości minimalnej pociągów towarowych,
- profilu podłużnego linii,
- lokalizacji miejsc zatrzymania pociągów pasażerskich i towarowych,
- ograniczeń terenowych – możliwości przesunięcia osi toru.

Na etapie studium wykonalności powinno się sprawdzić, czy osiągnięcie większej prędkości na rozpatrywanym łuku jest możliwe bez zmian układu geometrycznego toru. W tym celu należy sprawdzić wartości:

- promienia łuku,
- długości rampy przechyłkowej,
- długości krzywej przejściowej,
- dopuszczalnych warunków kinematycznych.

Jeżeli parametry te uniemożliwiają poruszanie się z większą (ustaloną na danym odcinku linii) prędkością, należy układ przebudować.

1.4. Określenie wartości granicznych

Początkiem procesu projektowego jest zebranie danych wejściowych dla określonego typu linii. Identyfikuje się między innymi oczekiwaną prędkość projektową, istniejący układ geometryczny (kierunki proste i kąt zwrotu trasy), możliwość przesunięcia układu ze względu na znajdujące się w pobliżu przeszkody i obiekty inżynierijne. W skład prędkości projektowej wchodzi: maksymalna prędkość pojazdów kolejowych (bez systemu kompensacji przyspieszeń odśrodkowych) i uśredniona prędkość najwolniejszych, kursujących regularnie pojazdów kolejowych. Opierając się na przepisach, przyjmuje się parametry kinematyczne, takie jak: dopuszczalną wartość nie zrównoważonego przyspieszenia odśrodkowego i dośrodkowego, dopuszczalną prędkość podnoszenia się koła pojazdu na rampie przechyłkowej, dopuszczalną prędkość przyrostu przyspieszenia nie zrównoważonego [7].

Dla taboru konwencjonalnego, poruszającego się po łuku kołowym, wartość nie zrównoważonego przyspieszenia bocznego określa zależność [65]:

$$a = \frac{V_p^2}{12,96R} - g \frac{h}{s} \leq a_{dop} \quad (1.23)$$

gdzie:

a_{dop} nie zrównoważone przyspieszenie odśrodkowe w m/s^2 ,

- V_p prędkość pojazdu w km/h ,
 g przyspieszenie ziemskie $g = 9,81$ w m/s^2 ,
 h wartość przechyłki na łuku kołowym (lub różnica przechyłek w łukach, pomiędzy którymi wykonuje się rampę przechyłkową) w mm ,
 s rozstaw osi toków szynowych w mm .

Dopuszczalne wartości niezrównoważonego przyspieszenia odśrodkowego a_{dop} dla toru w łuku, zgodnie z *Nowelizacją Rozporządzenia* [7], wynoszą:

- ruch pasażerski – $0,85$ m/s^2 ($1,0$ m/s^2 w przypadku ruchu pasażerskiego wykonywanego taborem spełniającym wymagania TSI [6], uwzględniającą tę wartość);
- ruch towarowy – $0,72$ m/s^2 ;
- tory boczne ($V_{max} \leq 40$ km/h) – $0,65$ m/s^2 ;
- łuki o promieniach 200 $m < R \leq 250$ m – $0,65$ m/s^2 ;
- łuki o promieniach $R \leq 200$ m – $0,45$ m/s^2 .

Dopuszczalne wartości niezrównoważonego przyspieszenia odśrodkowego w Polsce mieszczą się więc w granicach $a_{dop} = 0,45 \div 1,0$ m/s^2 [7]. Natomiast w Niemczech i Włoszech $a_{dop} = 0,6$ m/s^2 , w Austrii $a_{dop} = 0,65$ m/s^2 , w Japonii na linii Tokaido $a_{dop} = 0,4$ m/s^2 a w Rosji, Białorusi i Ukrainie $a_{dop} = 0,7$ m/s^2 [13].

Dopuszczalne wartości niezrównoważonego przyspieszenia dośrodkowego a_t dla obciążenia przewozami Q [Tg/rok], zgodnie z *Nowelizacją Rozporządzenia* [7], wynoszą:

- $0 \leq Q < 5$ – $a_t = 0,72$ m/s^2 ;
- $5 \leq Q < 10$ – $a_t = 0,62$ m/s^2 ;
- $10 \leq Q < 15$ – $a_t = 0,52$ m/s^2 ;
- $15 \leq Q < 20$ – $a_t = 0,42$ m/s^2 ;
- $Q \geq 20$ – $a_t = 0,32$ m/s^2 .

Dopuszczalne wartości prędkości przyrostu przyspieszenia niezrównoważonego ψ_{dop} , zgodnie z *Nowelizacją Rozporządzenia* [7], wynoszą:

- tory główne zasadnicze i szlakowe – trudne warunki terenowe – $0,5$ m/s^3 ;
- tory główne zasadnicze i szlakowe – dogodne warunki terenowe – $0,3$ m/s^3 ;
- tory główne dodatkowe, boczne, rozjazdy i połączenia torów – $1,0$ m/s^3 .

Dopuszczalna wartość prędkości podnoszenia koła taboru na prostoliniowych rampach przechyłkowych nie może przekroczyć [7]:

- wartości zasadniczej – $f = 28$ mm/s ;
- wartości dopuszczalnej – $f = 50$ mm/s .

Wartości dopuszczalnej prędkości podnoszenia koła na prostoliniowej rampie określone w *normie PN-EN 13803-1* [5] przedstawione są w tabeli 1.2. Przy czym niedobór przechyłki $h^- < 153$ mm i $dh^-/dt \leq 70$ mm/s , a wartość dopuszczalna f może być podniesiona do $f = 85$ mm/s w trudnych warunkach.

Zagadnienie określania granicznych parametrów kinematycznych szczegółowo opisuje M. Bałuch [20, 23].

Przekształcając wyrażenie (1.23) otrzymujemy zależność:

$$V_{max}^R = 3,6 \sqrt{a_{dop} + g \frac{h_{max}}{s}} \quad (1.24)$$

	f_{dop} [mm/s]	
	wartość zasadnicza	wartość dopuszczalna
$V_{max} \leq 200$		
$h^- \leq 168$ mm	50 mm/s	70 mm/s
$168 < h^- \leq 183$ mm	50 mm/s	50 mm/s
200 km/h < $V_{max} \leq 300$ km/h		
	50 mm/s	60 mm/s

Tab. 1.2. Wartość dopuszczalnej prędkości podnoszenia koła na prostoliniowej rampie przechyłkowej wg [4]

gdzie:

V_{max}^R prędkość maksymalna na łuku z uwagi na jego promień w *km/h*,
 h_{max} maksymalna wartość przechyłki w *mm*.

Prędkości wyznaczonej z wyrażenia (1.24) odpowiadają na krzywej przejściowej o liniowym rozkładzie krzywizny, maksymalne prędkości:

$$V_0^{l,\psi} = 3,6 \frac{\psi_{dop}}{a_{dop}} l, \quad (1.25)$$

$$V_0^{l,f} = 3,6 \frac{f_{dop}}{h_{max}} l, \quad (1.26)$$

gdzie:

$V^{l,\psi}$ maksymalna możliwa do zastosowania prędkość na krzywej przejściowej z uwagi na prędkość przyrostu przyspieszenia w *km/h*,
 $V^{l,f}$ maksymalna możliwa do zastosowania prędkość na krzywej przejściowej z uwagi na prędkość podnoszenia koła na rampie przechyłkowej w *km/h*,
 f_{dop} dopuszczalna prędkość podnoszenia się koła na rampie przechyłkowej w *mm/s*.

O wartości prędkości na układzie geometrycznym złożonym z łuku kołowego i krzywych przejściowych decyduje prędkość wyznaczona z zależności (1.24) oraz wartość mniejsza spośród prędkości opisanych wyrażeniami (1.25) i (1.26). Jeżeli wartość $V_{max}^R \leq \min(V_0^{l,\psi}, V_0^{l,f})$, maksymalna prędkość na całym układzie (krzywa przejściowa, łuk, krzywa przejściowa) $V_{max}^{R,l} = V_{max}^R$. W przeciwnym przypadku konieczne jest ograniczenie prędkości ze względu na krzywą przejściową. Szczegółowy opis tego przypadku (dla taboru z wychylnymi nadwoziami) został omówiony w książce prof. Koca [65].

Wartość promienia minimalnego łuku powinna uwzględniać następujące parametry:

- dopuszczalne niezrównoważone przyspieszenie odśrodkowe a_{dop} ,
- maksymalną dopuszczalną przechyłkę h_{max} ,
- maksymalną prędkość V_{max} .

Minimalny promień łuku kołowego określa zależność:

$$R_{min} = \frac{V_{max}^2}{a_{dop} + \frac{g}{s} h_{max}} \quad (1.27)$$

Kategorie linii kolejowych	Minimalny promień R_{min} [m]		
	teren nizinny	teren podgórski	teren górski
magistralna	1400	1200	600
pierwszorzędna	1200	600	400
drugorzędna	600	400	300
znaczenia miejscowego	400	250	200

Tab. 1.3. Wartości minimalnych promieni łuku poziomego [1]

gdzie:

V_{max} maksymalna prędkość pojazdów kolejowych bez systemu kompensacji przyspieszeń odśrodkowych km/h .

Minimalny promień łuku określa się dla konkretnego przypadku, w zależności od typu linii i prędkości projektowej. Dla linii o określonej kategorii minimalny promień został określony w *Rozporządzeniu Ministra* [1]. Wartości minimalnych promieni łuków, zgodnie z *Rozporządzeniem Ministra* [1], należy przyjmować na podstawie tabeli 1.3, przy jednoczesnym zastrzeżeniu (odnoszącym się bezpośrednio do tematyki modernizacji linii kolejowej):

- na nowo budowanych liniach magistralnych, gdzie prędkość pociągów może przekraczać $160 km/h$, minimalny promień łuku $R_{min} = 4000 m$, na liniach modernizowanych $R_{min} = 2000 m$;
- zarządca infrastruktury może w uzasadnionych przypadkach wyrazić zgodę na zaniechanie modernizacji łuku przy modernizacji linii.

Zgodnie z normą *PN-EN 13803-1* [5] minimalna wartość promienia $R_{min} = 190 m$. Przy określaniu wartości promienia należy również wziąć pod uwagę następujące czynniki:

- prędkość maksymalną i minimalną,
- dobraną wartość przechyłki,
- wartości graniczne niedoboru i nadmiaru przechyłki.

W normie występują zastrzeżenia, że zalecane jest, aby promień łuku usytuowanego wzdłuż peronu nie był mniejszy niż $500 m$. Zaznaczono również, że stosowanie małych promieni może wymagać dodatkowego poszerzenia toru.

Zgodnie z *Rozporządzeniem Unii Europejskiej* [6] minimalny promień łuku poziomego powinien być dobierany adekwatnie do miejscowej projektowej prędkości na łuku (przy czym zakłada się, że minimalny projektowy promień łuku poziomego dla nowych linii nie może być mniejszy niż $150 m$). Przepisy określają również promienie minimalne dla przypadku łuków odwrotnych.

$$R_{min} = \frac{C_h}{h + h_{max}^-} \cdot V_{max}^2 \quad (1.28)$$

gdzie:

h_{max}^- maksymalny niedobór przechyłki w mm ,
 C_h współczynnik wynoszący $C = 11,8 mm \cdot m \cdot h^2 / km^2$.

Jeżeli wartość $h > E_{lim}$, należy również obliczyć wartość promienia maksymalnego R_{max} :

$$R_{max} = \frac{C_h}{h - h_{max}^+} \cdot V_{min}^2 \quad (1.29)$$

gdzie:

V_{min} prędkość minimalna w km/h ,
 h_{max}^+ maksymalny nadmiar przechyłki w mm .

Zgodnie z *Rozporządzeniem Ministra* wraz z *nowelizacją* [1, 7], w części kołowej łuku, w celu zrównoważenia występującego przyspieszenia, powinno stosować się przechyłkę spełniającą nierówność:

$$\frac{11,8V_{max}^2}{R} - \frac{s}{g} \cdot a_{dop} \leq h \leq \frac{11,8V_t^2}{R} + \frac{s}{g} \cdot a_t \quad (1.30)$$

gdzie:

V_t uśredniona prędkość najwolniejszych, kursujących regularnie pojazdów kolejowych w km/h ;
 a_t dopuszczalna wartość niezrównoważonego przyspieszenia dośrodkowego w m/s^2 .

W oparciu o z *Rozporządzenie Ministra* [1] projektowana przechyłka powinna również mieścić się w granicach $20 \text{ mm} \leq h \leq 150 \text{ mm}$.

Wartość przechyłki powinna być określona w oparciu o następujące parametry [5]:

- duża wartość przechyłki na łukach o małych promieniach zwiększa ryzyko wykolejenia taboru towarowego kursującego z małą prędkością; w takich przypadkach obciążenie toku zewnętrznego jest zmniejszone, szczególnie w przypadkach wichrowatości toru (zgodnie z *normą PN-EN 13803-1* [5]);
- przechyłka powyżej 160 mm może wywoływać przemieszczanie się ładunku towarowego i pogorszenie komfortu jazdy pasażerów, gdy pociąg wytraca prędkość lub porusza się z nieznaczną prędkością. Poruszanie się z taką prędkością może powodować niestabilność dla pojazdów technicznych i innych, o wysoko usytuowanym środku ciężkości;
- wysoka wartość przechyłki zwiększa wartość nadmiaru przechyłki w łukach, w których występują duże różnice pomiędzy prędkościami najszybszych i najwolniejszych pociągów;
- zasadnicza wartość przechyłki na liniach wynosi $h = 160 \text{ mm}$;
- dopuszczalna wartość przechyłki na liniach wynosi $h = 180 \text{ mm}$.

Należy jednak podkreślić pewną różnicę w rozumieniu wartości zasadniczej i dopuszczalnej w rozumieniu *normy PN-EN 13803-1* [5] i przepisów *Rozporządzenia Ministra* [1]. Wartości podane w normie nie są wartościami, na które należy projektować układ, ale są ograniczeniem (limitem), którego nie powinno się w żadnym przypadku przekraczać. Aby uniknąć ryzyka wykolejenia dla wagonów towarowych na małych promieniach, gdzie promień $R < 320 \text{ m}$, wartość przechyłki zasadniczej powinna spełniać zależność:

	Przechyłka h [mm]	
	Ruch towarowy i mieszany	Ruch pasażerski
tor na podsypce tłuczniowej	160	180
tor bez podsypki tłuczniowej	170	180

Tab. 1.4. Wartości projektowe przechyłki wg Rozporządzenia UE [mm] [6]

Prędkość [km/h]	Wartość zasadnicza (dopuszczalna) h^- [mm]
Tabor konwencjonalny	
$80 < V_{max} \leq 200$	130 (183)
$200 < V_{max} \leq 230$	130 (168)
$230 < V_{max} \leq 250$	130 (153)
$250 < V_{max} \leq 300$	100 (130)
Tabor z wychylnym pudłem	
$80 \leq V_{max} \leq 260$	275 (306)

Tab. 1.5. Wartości dopuszczalne niedoboru przechyłki zgodnie z normą PN-EN 13803-1 [5]

$$h_{max} = \frac{R - 50m}{1,5m/mm} \quad (1.31)$$

Zastosowanie się do tegoż limitu ułatwia późniejsze utrzymanie toru.

Zgodnie z obowiązującymi przepisami *Rozporządzenia UE* [6] wartość projektowanej przechyłki dla toru o normalnej szerokości jest ograniczona zgodnie z tabelą 1.4.

Na nowych liniach, gdzie występuje ruch mieszany lub towarowy, na łukach o promieniu $R < 305$ m i pochyleniu rampy przechyłkowej bardziej stromym niż 1 mm/m, przechyłkę ogranicza się do wartości określonej zależnością (1.31).

W przepisach europejskich określa się wartości niedoboru przechyłki. Dla szerokości toru 1435 mm wartość niezrównoważonego przyspieszenia odśrodkowego przedstawia zależność:

$$a_p = \frac{h^-}{153} \quad (1.32)$$

gdzie:

h^- niedobór przechyłki w mm.

Graniczne wartości niedoboru przechyłki, przedstawione w *normie PN-EN 13803-1* [5], zamieszczono w tabeli 1.5.

Wartości dopuszczalnych niedoborów przechyłki stosowanych na Świecie prezentuje tabela 1.6. Zgodnie z warunkami określonymi w *Rozporządzeniu UE* [6] maksymalne wartości niedomiary przechyłki wynoszą:

- 130 mm dla prędkości konstrukcyjnej $V_{max} \leq 160$ km/h dla taboru dopuszczalnego zgodnie z przepisami TSI "wagony towarowe";
- 153 mm dla prędkości konstrukcyjnej $V_{max} \leq 300$ km/h dla taboru dopuszczalnego zgodnie z przepisami TSI dla lokomotyw i taboru pasażerskiego;

Kraj	Maksymalny niedobór przechyłki h^- [mm]
Polska	122
Niemcy	100 (130)
Słowacja	165
Wielka Brytania	90, 110, 150
Francja	180
Norwegia	180
Szwecja	150-180
Bangladesz	38, 51, 76
Indie	75 (100)

Tab. 1.6. Wartości dopuszczalne niedoboru przechyłki

- 100 mm dla prędkości konstrukcyjnej $V_{max} > 300$ km/h dla taboru dopuszczalnego zgodnie z przepisami TSI dla lokomotyw i taboru pasażerskiego.

Nadmiar przechyłki h^+ , zgodnie z normą *PN-EN 13803-1* [5], jest opisany następującą zależnością:

$$h^+ = h - C \cdot \frac{V_{max}^2}{R} = h - h_{teor} \quad (1.33)$$

gdzie:

- h^+ nadmiar przechyłki w *mm*,
- h_{teor} przechyłka teoretyczna (przy której nie występuje niezerównoważone przyspieszenie) w *mm*.

Wartość zasadnicza w rozumieniu normy, czyli maksymalna wartość nadmiaru przechyłki, wynosi 110 mm. Wartość ta odpowiada przyspieszeniu dośrodkowemu $a_t = 0,72$ m/s², czyli wartości a_t podawanej w *nowelizacji Rozporządzenia Ministra* [7] dla przewozów do 5 Tg/rok.

Dla dobranej wartości przechyłki można określić długość krzywej przejściowej. Najczęściej stosowanym typem krzywej przejściowej w Polsce jest parabola trzeciego stopnia, jednak zgodnie z przepisami [1] można również stosować inne typy krzywych, również z krzywoliniowymi rampami przechyłkowymi (np. krzywą Blossa, cosinusoidę [65]).

Zakłada się, że na początku krzywej przejściowej przyspieszenie niezerównoważone jest równe zero, a na końcu ma wartość równą a (taką jak na łuku kołowym). Przyspieszenie wzrasta od zera do a w czasie t na długości krzywej (pojazd porusza się ze stałą prędkością). Przyrost przyspieszenia ψ można więc opisać zależnością:

$$\psi = \frac{da}{dt} = \frac{a}{t} = \frac{aV_p}{L_0} \quad (1.34)$$

Przy podstawieniu prędkości w km/h wartość $\psi = \frac{aV}{3,6L_0}$.

Przyjmując wartość dopuszczalną przyrostu przyspieszenia ψ , można wyznaczyć minimalną długość krzywej przejściowej:

$$L_{min}^{\psi} = \frac{a_{dop} V_{max}}{3,6\psi_{dop}} \quad (1.35)$$

gdzie:

ψ_{dop} dopuszczalna wartość przyrostu przyspieszenia w m/s^3 .

Ponieważ kształt krzywej jest powiązany z kształtem rampy przechyłkowej, długość krzywej przejściowej wynika również z potrzebnej długości rampy. Rampa przechyłkowa musi spełniać warunek nieprzekroczenia dopuszczalnej prędkości podnoszenia się koła, tj:

$$f = \frac{dh}{dt} \leq f_{dop} \quad (1.36)$$

gdzie:

f prędkość podnoszenia się koła na rampie przechyłkowej w mm/s .

Jeżeli przyjmie się założenie, że prędkość pociągu jest stała i wynosi V_p (w obrębie rampy), otrzymuje się następującą zależność:

$$f = \frac{V_p \cdot h}{3,6L_0} \leq f_{dop} \quad (1.37)$$

Wymagana długość krzywej przejściowej (najczęściej tożsama z długością rampy przechyłkowej) z uwagi na prędkość podnoszenia koła po rampie wyniesie wówczas:

$$L_{min}^f = \frac{V_{max} \cdot h}{3,6f} \quad (1.38)$$

Przy wyznaczaniu minimalnej długości krzywej przejściowej należy również uwzględnić dokładność tyczenia, tj. minimalne przesunięcie łuku kołowego n_{min} . Przesunięcie takie nie powinno być mniejsze niż 0,02 m. Przyjmując do obliczeń przybliżoną zależność $n = \frac{L^2}{24R}$, otrzymuje się wyrażenie na minimalną długość krzywej przejściowej:

$$L_{min}^n = \sqrt{24n_{min}} \sqrt{R} = 0,7\sqrt{R} \quad (1.39)$$

gdzie:

n_{min} minimalne przesunięcie łuku kołowego do wewnątrz w m .

Długość krzywej przejściowej musi spełniać warunki mające na uwadze prędkość podnoszenia koła na rampie przechyłkowej, dopuszczalną wartość przyrostu przyspieszenia niezrównoważonego, jak również dokładność tyczenia. Przyjmuje się, że minimalna długość krzywej przejściowej jest równa [1]:

$$L_{min} = \sup(L_{min}^\psi; L_{min}^f; L_{min}^n) \quad (1.40)$$

Przy projektowaniu łuku poziomego z krzywymi przejściowymi należy również sprawdzić, czy dla projektowanej długości krzywej przejściowej, promienia łuku kołowego i kąta zwrotu trasy spełniony jest warunek na minimalną długość łuku. Wartość ta dla odcinka kołowego o jednakowej przechyłce powinna wynosić (w torach głównych linii magistralnych i pierwszorzędnym) [1]:

$$k_{min} = \sup\left(\frac{V_{max}}{2,5}; 30\right) \quad (1.41)$$

gdzie:

V_{max}	w_{min} [m] i k_{min} [m]	
	$80 \leq V_{max} \leq 200$	$200 < V_{max} \leq 300$
wartość zasadnicza	$\frac{V_{max}}{3}$	$\frac{V_{max}}{1,5}$
wartość dopuszczalna	$\frac{V_{max}}{5}$	$\frac{V_{max}}{2,5}$

Tab. 1.7. Wartości minimalnych długości wstawek prostych i części kołowej łuku [5]

k_{min} minimalna długość łuku kołowego w m .

Najmniejsza długość toru prostego bez przechyłki i poszerzenia, pomiędzy łukami kołowymi, rampami przechyłkowymi lub krzywymi przejściowymi, powinna wynosić [7]:

- tory główne i szlakowe – warunki normalne:

$$w_{min} = \frac{V_{max}}{2,5}; \quad (1.42)$$

- tory główne i szlakowe – warunki trudne:

$$w_{min} = \sup\left(\frac{V_{max}}{3,0}; 20\right); \quad (1.43)$$

- tory pozostałe $w_{min} = 10$ m.

gdzie:

w_{min} minimalna długość wstawki prostej w m .

W normie *PN-EN 13848-1* [5] wartość graniczna długości części kołowej łuku k_{min} bądź też wstawki prostej w_{min} pomiędzy krzywymi przejściowymi, można oznaczana jako L_{kw} , wynosi 20 m i powinna spełniać nierówność:

$$L_{kw} \geq 20 \quad m \quad (1.44)$$

przy czym, w zależności od maksymalnej prędkości przyjmuje się wartości podane w tabeli 1.7.

Określając zakres prac modernizacyjnych należy dostosować parametry istniejącej linii kolejowej do obowiązujących przepisów. Wymagania określone w przedstawionych dokumentach różnią się od siebie, a ich dobór zależy od rangi dokumentu. Obowiązującymi są wartości wskazane w *Rozporządzeniu Ministra* [1] wraz z jego *nowelizacją* [7], jeżeli jednak w pozostałych dokumentach opisane są bardziej restrykcyjne wymagania, należy przeanalizować zasadność ich stosowania w konkretnym przypadku. W *Standardach Technicznych* [106] zapisano, że w przypadku niezgodności zapisów z *Rozporządzeniem* [1] można stosować wartości ze *Standardów* również w przypadku niespełnienia warunków *Rozporządzenia*, po każdorazowym uzyskaniu odstępstwa, do czasu wejścia w życie odpowiedniej nowelizacji.

Rozdział 2

Algorytmy optymalizacyjne

Znalezienie optymalnego rozwiązania projektowego, w którym uwzględnione zostaną wszystkie aspekty mające wpływ na jego realizację, można nazwać problemem NP-trudnym. Tradycyjne metody optymalizacyjne często pozwalają osiągnąć wartość optymalną, lecz najczęściej są zbyt uproszczone i uwzględniają niewystarczająco wiele kryteriów [74]. Postanowiono więc skupić się na metodach, które mogą ułatwić znalezienie rozwiązań zbliżonych do najlepszych w stosunkowo krótkim czasie. Zbiór reguł, które pozwalają spełnić to założenie, nazywa się heurystyką. Słowo to wywodzi się od okrzyku „heureka” (znalazłem), wydanego przez Archimedesesa w momencie odkrycia Prawa Hydrostatyki. W historii odkryć nowe rozwiązania czy wynalazki często znajdowane były przypadkowo, bądź wtedy, gdy ich poszukiwania wymagały wykroczenia poza pewien utarty schemat [133]. Przy rozwiązywaniu opracowywanego problemu należy więc stworzyć szereg reguł wspomagających generowanie rozwiązań zbliżonych do optymalnych. Wykorzystanie metod szukania heurystycznego ma również tę zaletę, że w procesie przeszukiwania można korzystać z nieformalnej i nieusystematyzowanej wiedzy eksperckiej (włączonej do procesu w postaci nowej reguły), niemniej jednak podnoszącej efektywność przeszukiwania [122]. W tego typu przeszukiwaniu nie można optymalnego rozwiązania zagwarantować, ale można to rozwiązanie stopniowo poprawiać, tworząc nowe optymalizacyjne algorytmy. Aby heurystyki były generowane w sposób prawidłowy, należy stworzyć specjalne reguły (zasady) odpowiadające za ten proces. Zasady, według których generowane są algorytmy heurystyczne, nazywane są metaheurystykami. Są one pewnego rodzaju ”wskazówką” procesu przeszukiwania [30], wyższym poziomem niż same heurystyki (meta – oznacza nad). Ich skuteczność z punktu widzenia teoretycznego i praktycznego zależy od cechujących je właściwości. Pożądanymi cechami są [57]:

- prostota – metaheurystyki powinny opierać się na prostych i zrozumiałych zasadach, możliwych do zastosowania w wielu przypadkach;
- precyzja – algorytm rozwiązywania powinien być opisany dokładnym matematycznym zapisem, niezależnym od analogii fizycznej bądź biologicznej, będącej źródłem jego inspiracji;
- spójność – na każdym etapie heurystyki powinny wynikać z ogólnie przyjętych zasad metaheurystyki;
- wydajność – heurystyki dla konkretnych problemów powinny zapewnić znalezienie optymalnych lub bliskich optimum rozwiązań dla wszystkich lub co najmniej najbardziej realistycznych przypadków;
- skuteczność – uzyskiwanie rozwiązań bliskich optymalnym powinno odbywać się przy założeniu umiarkowanego czasu obliczeń;

- odporność – wydajność heurystyki powinna być taka sama dla wszystkich obszarów - nie powinna ograniczać się tylko do jakiegoś konkretnego przypadku;
- powszechność – heurystyki powinny być prosto wyrażone i łatwe w użyciu (powinny mieć jak najmniejszą ilość parametrów);
- innowacyjność – wykorzystanie metaheurystyk powinno w efekcie prowadzić do rozwijania nowych zastosowań.

2.1. Algorytmy metaheurystyczne

Jednym z bardziej znanych przykładów zastosowania metod przeszukiwania heurystycznego jest rozszyfrowanie przez polskich matematyków kodu Enigmy w latach trzydziestych dwudziestego wieku. Trudno jest jednak określić moment, w którym po raz pierwszy wykorzystano metody metaheurystyczne. Niemniej jednak, ich rozwój przypada na lata 70 dwudziestego wieku. Metody te w dużej mierze zostały zainspirowane procesami fizycznymi, mechanizmami biologicznymi, czy też zachowaniami społecznymi. Z uwagi na ilość rozwiązań bieżących można podzielić je na dwie grupy. Przykładowymi metodami opierającymi się na optymalizacji samotnego przeszukiwania, tj. z jednym rozwiązaniem bieżącym, są [74]:

- przeszukiwanie tabu – tabu search (TS) [48, 51];
- symulowane wyżarzanie – simulated annealing (SA) [62, 99, 124];
- zmienne przeszukiwanie sąsiedztwa – variable neighbourhood search (VNS) [45, 56, 57, 85];
- iteracyjne przeszukiwanie lokalne – iterated local search (ILS) [80, 134].

Metodami metaheurystycznymi z wieloma rozwiązaniami bieżącymi, opartymi na algorytmach populacyjnych i ewolucyjnych, są przykładowo [9]:

- algorytmy mrówkowe – ant colony optimization (ACO) [42, 90, 99];
- rój cząstek – particle swarm optimization (PSO) [61, 125];
- przeszukiwanie rozproszone – scatter search (SS) [50, 78];
- algorytmy genetyczne – genetic algorithms (GA) [58, 96, 103].

Przeszukiwanie z tabu (TS) zostało przedstawione przez Freda Glovera w 1986 roku [49]. Metoda ta polega na odtworzeniu ludzkiego procesu szukania rozwiązania problemu. W najprostszej swojej formie algorytm rozpoczyna się od zdefiniowanego rozwiązania startowego [91]. Rozwiązanie to znajduje się w pewnym otoczeniu, określonym jako zbiór rozwiązań. Sąsiedztwo aktualnego rozwiązania jest przeszukiwane w celu znalezienia innego rozwiązania (z zamiarem znalezienia rozwiązania lepszego od aktualnego) [122]. Wybrane rozwiązanie zostaje w następnej iteracji potraktowane jako aktualne, a przeszukiwanie jest kontynuowane. Kluczowym elementem tej metody jest zastosowanie pamięci tzw. listy zabronień, co pozwala na wyjście z obszaru ekstremum lokalnego i przejście w inny obszar poszukiwań. Tabu search opiera się na heurystykach, które są procesami iteracyjnymi. Z tego powodu najczęściej wykorzystuje się je wyłącznie w zadaniach kombinatorycznych [122].

Algorytm symulacyjnego wyżarzania (SA) przedstawiony został w dwóch niezależnych pracach – z roku 1983 [62] i 1985 [39]. W omawianej metaheurystyce wykorzystano prawa mechaniki statycznej. Inspiracją algorytmu było zjawisko

stygnięcia metali. Stopniowe ochładzanie metalu powoduje bardziej uporządkowany rozkład jego cząsteczek. Równomierne rozłożenie cząsteczek jest uzależnione od dobrania odpowiedniej temperatury stygnięcia metalu. Zanim jednak osiągnie się temperaturę końcową, cząsteczki mogą układać się w sposób mniej uporządkowany – tak, by w kolejnych etapach procesu wyżarzania znaleźć swoje położenie optymalne [99]. Algorytm symulacyjnego wyżarzania jest procesem iteracyjnym, w którym w każdym kroku przeszukuje się sąsiedztwo obecnego rozwiązania. W pojedynczej iteracji generowany jest zbiór próbny wybierany z sąsiedztwa bieżącego rozwiązania i następuje wybór jednego z nich, które będzie wykorzystane w następnej iteracji. W trakcie przeszukiwania akceptowane są rozwiązania lepsze i takie, których wartość funkcji jest mniejsza (ze zdefiniowanym prawdopodobieństwem, które maleje wraz ze spadkiem temperatury) [122]. Dzięki takiej konstrukcji omawianej metaheurystyki umożliwia się wyjście poza optima lokalne na początku iteracji i wybór rozwiązań lepszych pod koniec procesu wyżarzania [99]. Algorytm cechuje się niewątpliwą prostotą działania i łatwością w implementacji, nie zawsze jest jednak skuteczny i szybki w odnajdowaniu optymalnego rozwiązania.

Algorytm zmiennego przeszukiwania sąsiedztwa przedstawiony został przez Hansena i Mladenoviča [56, 85]. Założono, że tylko lokalne, rutynowe przeszukiwanie może prowadzić do stworzenia nowej metaheurystyki. Idea algorytmu polega na zmianie sąsiedztwa poprzez przystosowanie go do procesu przeszukiwania. W przeciwieństwie do innych metaheurystyk, które oparte są na metodach lokalnego przeszukiwania, metoda ta nie podąża śladem rozwiązania, ale bada coraz bardziej odległe obszary sąsiedztwa aktualnego rozwiązania. Przejście do następnej iteracji następuje w momencie uzyskania minimum lokalnego. W ten sposób charakterystyki dominującego rozwiązania będą zapamiętane i wykorzystane w celu uzyskania bardziej obiecujących rozwiązań, znajdujących się w ich sąsiedztwie. Konstrukcja opisywanej metaheurystyki sprawia, że po przejściu z minimum lokalnego następne przeszukiwania będą małe [56]. Ta metoda jest pomocna w przypadku, gdy optima lokalne mają tendencję do tworzenia skupień [122].

Metoda iteracyjnych lokalnych przeszukiwań (ILS) to przeszukiwanie bieżącego rozwiązania w celu znalezienia optimum lokalnego i określenie rozwiązania globalnego. W algorytmie występują dwa zasadnicze kroki: „insertion step”, w którym do rozwiązania wybierane i wstawiane są nowe elementy oraz „shake step”, w którym z grupy rozwiązań usuwa się wyniki nie pozwalające na wydostanie się poza zakres lokalnego optimum. Kolejne iteracje wykonywane są, dopóki nie zostanie przekroczona zadana liczba rozwiązań nie wykazujących poprawy [134].

Algorytmy mrówkowe (ACO) zostały zaprezentowane po raz pierwszy w roku 1992 przez M. Dorigo [41]. Powstały one na podstawie obserwacji żywych mrówek komunikujących się ze sobą za pomocą pozostawianego feromonu [122]. Mrówki lokalizują w ten sposób najkrótszą drogę prowadzącą je do pożywienia. Algorytm ten najczęściej używany jest w zadaniach kombinatorycznych, na przykład do problemu znajdowania krótkich ścieżek w grafach – problem komiwojażera. W algorytmie tworzony jest zadany zbiór agentów, nazywanych (sztucznymi) mrówkami – stosujący tą samą strategię dotarcia najkrótszą drogą do celu. Służą one do budowy rozwiązań konstruowanych etapami. Ocenie podlegają końcowe rozwiązania. Mrówki pozostawiają feromonowy ślad na znalezionych trasach – im ścieżka jest krótsza, tym więcej feromonu na trasie. Ilość pozostawionego feromonu ma wpływ na wybór rozwiązania [99].

Autorski algorytm zachowania się stada przedstawiony został przez Kennedy'ego i Eberharta w roku 1995 [61]. Bodźcem do stworzenia metaheurystyki nazywanej rojem cząstek (PSO) były zachowania społeczne obserwowane w pewnych grupach – u ptaków, ryb. Ptaki lecące w grupie przemieszczają się w sposób niezwykle zharmonizowany, potrafiąc zmieniać kierunki, tempo, przegrupowując się zupełnie bezkolizyjnie. Kluczowe założenie w opracowanej metodzie to możliwość wymiany i dzielenia się informacjami pomiędzy poszczególnymi osobnikami. Przyjęto również, że osobniki będące w stadzie mogą podejmować decyzje wyłącznie na podstawie ich otoczenia [122]. Metoda ta opiera się na wielu cechach będących istotnymi paradygmatami programowania ewolucyjnego.

Algorytm przeszukiwania rozproszonego opisywany jest przez F. Glovera [50], jako algorytm ewolucyjny budujący rozwiązania poprzez mieszanie ze sobą innych rozwiązań. Algorytm ten posiada, oprócz niezaprzeczalnych podobieństw do algorytmów ewolucyjnych, charakterystyczne cechy odpowiadające chociażby regułom mieszania [122].

Algorytmami ewolucyjnymi zaczęto interesować się już pod koniec lat 50 XX wieku [36, 37, 46], jednak rozwój obliczeń ewolucyjnych zapoczątkowały opracowania z lat 70 [58, 96, 103]. Publikacje te opisywały podstawy algorytmów genetycznych. Od tego momentu można zauważyć powszechne zainteresowanie tymi zagadnieniami [75, 81–84]. Ich popularność można zaobserwować w różnych dziedzinach inżynierii. Zastosowanie GA do optymalizacji zagadnień inżynierskich opisują np. [38, 72, 74, 87, 89, 97]. Uniwersalność tych metod powoduje, że są one wykorzystywane również w transporcie szynowym w Polsce [65, 88] i za granicą [47].

2.2. Wybór metody optymalizacji

Zadaniem stawianym optymalizacji jednokryterialnej jest obliczenie wartości, w której funkcja celu zależna jest od jednego kryterium. Optymalizacja taka ma sens głównie wtedy, gdy w danym przypadku nie ma innych czynników wpływających na problem. Może być wykorzystywana również wtedy, gdy założymy, że dane kryterium jest najważniejsze. Takie zadanie sprowadza się do wyłonienia najlepszego rozwiązania spełniającego założony cel – opisanego wartością najmniejszą lub największą. W bardziej złożonych problemach optymalizacja jednego parametru nie jest jednak wystarczająca (pomijane są bowiem inne parametry, które również mają wpływ na wyłonienie najlepszego rozwiązania). Jeżeli w procesie podejmowania decyzji ocenianych jest wiele parametrów, z których żaden nie jest ściśle decydujący, mamy do czynienia z zagadnieniem optymalizacji wielokryterialnej. W rozwiązaniu takiego problemu należy uwzględnić zbiór kryteriów. Dodatkowo należy zwrócić uwagę na znaczenie każdego z parametrów i w przypadku rozwiązywania problemów inżynierskich nadać im konkretną wagę. Kluczowym aspektem zadania optymalizacyjnego jest odpowiednie określenie funkcji celu, tak aby każdy z parametrów był odpowiednio rozpatrywany (minimalizowany lub maksymalizowany).

Przy doborze algorytmów optymalizacyjnych należy dokładnie przeanalizować rozpatrywany przypadek. Przyjęcie pewnych wstępnych założeń może ułatwić podjęcie decyzji. W omawianym przypadku w początkowej fazie określono, które z kryteriów zostaną uwzględnione w analizie i oceniono ich rolę w procesie

inwestycyjnym. Parametrami, które mają wpływ na wybór wariantu modernizacji układów geometrycznych toru, są [121]:

- koszt inwestycji,
- koszt utrzymania,
- wpływ na środowisko, zdrowie i życie ludzi,
- hałas i drgania,
- wywłaszczenia,
- zabytki i stanowiska archeologiczne,
- lokalizacja obiektów inżynierskich i istniejących elementów infrastruktury,
- prędkość projektowa na przyległych odcinkach,
- warunki gruntowo - wodne,
- zakres robót ziemnych,
- kolizje z uzbrojeniem,
- oddziaływania pól elektromagnetycznych i prądów błędzących,
- charakter linii.

Spośród tych parametrów wybrano trzy główne kryteria, które będą uwzględnione w dalszej analizie [119]:

- koszt inwestycji i utrzymania – określony z wykorzystaniem obliczeń kosztu cyklu życia LCC (Life Cycle Cost) dla szyn kolejowych;
- objętość robót ziemnych i lokalizacja istniejących elementów infrastruktury (uwzględnione poprzez określenie maksymalnego odsunięcia układu projektowanego od istniejącego);
- prędkość maksymalna uzyskiwana dla projektowanego układu.

Przyjęte kryteria wymagają zarówno minimalizacji (kryterium kosztowe i robót ziemnych), jak i maksymalizacji (kryterium prędkości). Należy również wygenerować skończoną liczbę różnych od siebie rozwiązań, które następnie będą podlegały ocenie. Podjęto decyzję, że w procesie optymalizacyjnym będzie można posłużyć się algorytmami ewolucyjnymi.

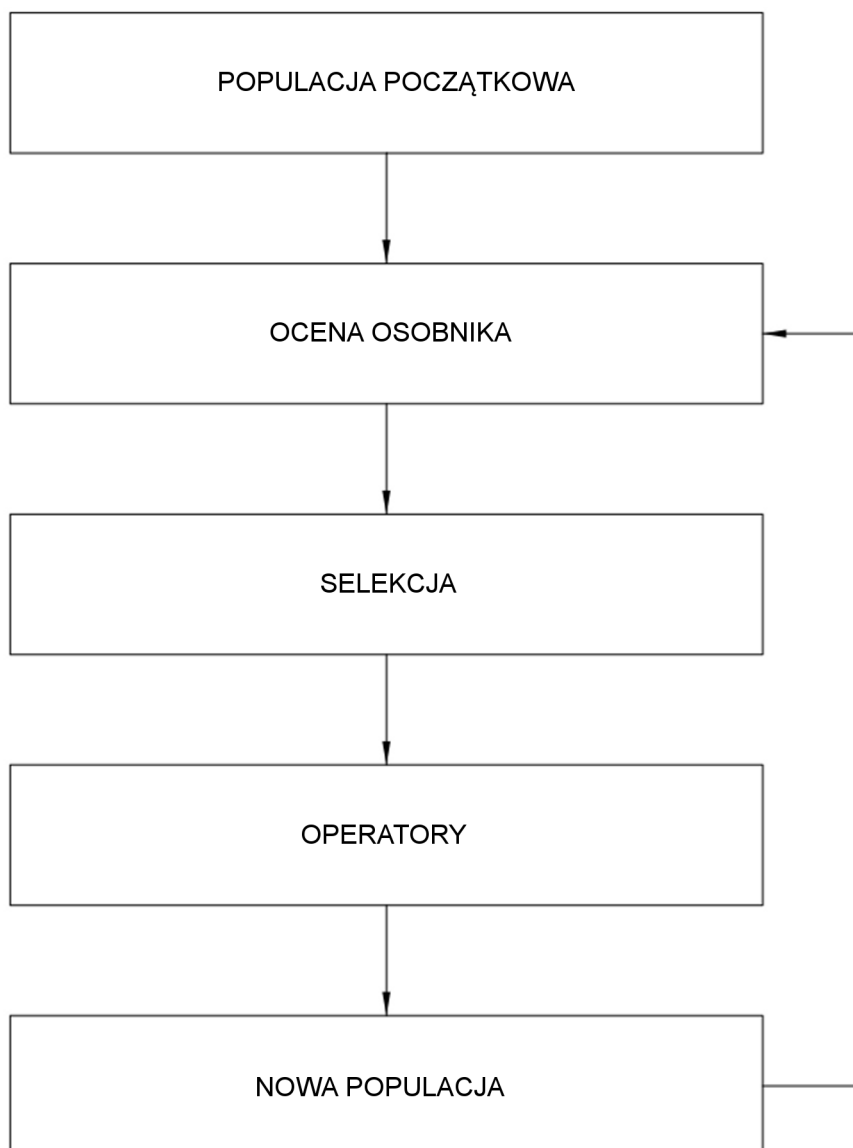
2.3. Charakterystyka algorytmu genetycznego

Słowo *ewolucja* (pochodzi z łac. *evolutio*), oznacza [43]:

- proces zachodzący w przyrodzie na przestrzeni wielu pokoleń, polegający na zmianie budowy organizmów i powstawaniu nowych;
- proces przeobrażeń, przechodzenia do stanów bardziej złożonych;
- proces stopniowego rozwoju społeczeństwa (od form prostszych do bardziej doskonałych).

Określenie ewolucja w znaczeniu rozwoju zostało użyte po raz pierwszy przez Albrechta von Hallera w 1744 r., lecz nie było w tamtych czasach popularne. Słowo to weszło do powszechnego użycia w dziewiętnastym wieku za sprawą Herberta Spencera [76]. Poprawnie sformułowana teoria ewolucji została przedstawiona przez Karola Darwina w dziele „O powstawaniu gatunków” wydanym w 1859 roku [71].

Algorytmy genetyczne (GA) zbudowane zostały na podstawie mechanizmów ewolucyjnych występujących w przyrodzie. Procesy te mają na celu stworzenie populacji składającej się z różnorodnych osobników (mniej lub bardziej przystosowanych do przetrwania). W algorytmach tych do potomnej populacji mają zostać skopiowane najlepsze – czyli najlepiej przystosowane osobniki. Występują tu również mechanizmy ewolucyjne podobne do naturalnych. Schemat działania algorytmu genetycznego przedstawia rysunek 2.1.



Rys. 2.1. Schemat algorytmu genetycznego

Generacja losowej populacji osobników

W pierwszym etapie tworzona jest losowa populacja osobników (chromosomy). Każdy osobnik jest opisywany przez różne geny charakteryzujące jego różnorodne

cechy (rys. 2.2). W klasycznym algorytmie genetycznym osobniki są kodowane binarnie, a więc poszczególne geny przyjmują wartości 0 i 1 [28].

Dla ułatwienia poszukiwań (ukierunkowanie procesu znajdowania optymalnego rozwiązania) populację można zasilić zakodowanym układem istniejącym [65, 88].

111110100 111100 111100 11000

Rys. 2.2. Przykładowy osobnik – chromosom

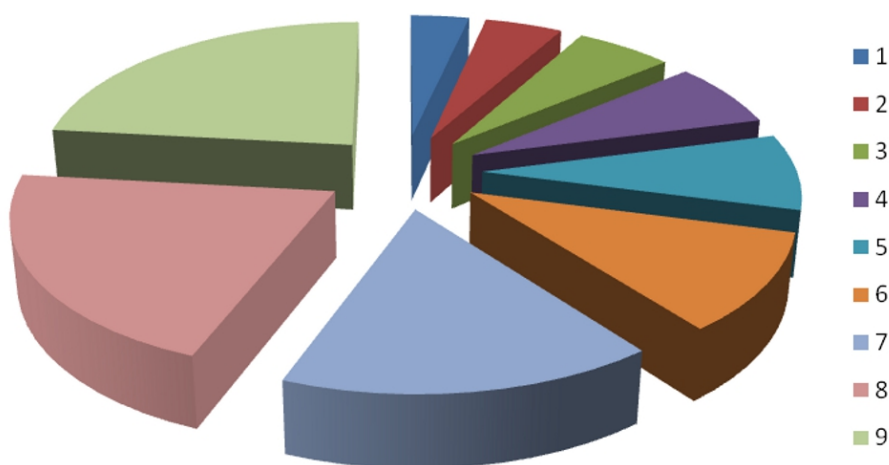
Ocena każdego osobnika - ocena dostosowania

Ocena osobnika polega na wyznaczeniu wartości funkcji celu dla każdego osobnika. Narzędziem służącym tej ocenie jest funkcja FF , czyli *fitness function*. Jej wartość obrazuje dostosowanie danego osobnika do rozwiązywanego zagadnienia [129].

Selekcja

Selekcja jest procedurą mającą na celu wyznaczenie prawdopodobieństwa wybrania osobnika z generacji losowej. Osobniki lepiej przystosowane do przetrwania powinny mieć większe prawdopodobieństwo selekcji – czyli powielania. Selekcja ukierunkowuje algorytm genetyczny w stronę lepszych rozwiązań [73, 89]. Rozróżniamy podstawowe typy selekcji [11, 52, 83]:

- selekcja ruletkowa (proporcjonalna),
- selekcja rangowa,
- selekcja turniejowa,
- selekcja elitarna.



Rys. 2.3. Przykład selekcji ruletkowej

Jeżeli f_i jest funkcją przystosowania danego i -tego osobnika [73], to prawdopodobieństwo selekcji osobnika dane jest wyrażeniem:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^n f_j} \quad (2.1)$$

gdzie:

$$\sum_{j=1}^n f_j \quad \text{suma dostosowań wszystkich osobników populacji.}$$

Taki typ selekcji nazywany jest selekcją ruletkową. Prawdopodobieństwo wylosowania osobnika można przedstawić jako wycinek koła, który przedstawiony został na rysunku 2.3.

W selekcji rangowej osobniki porządkuje się na podstawie przyznawanych im rang. Metoda ta jest bardzo zbliżona do selekcji za pomocą koła ruletki. Różnica polega na zmianie funkcji, która określa prawdopodobieństwo wyboru danego osobnika. Przed przystąpieniem do wyboru osobnikom nadawane są rangi uzależnione od ich położenia w szeregu. Miejsce to zależne jest od wartości funkcji celu. W celu maksymalizacji funkcji osobniki powinny być posortowane rosnąco, w przeciwnym przypadku – malejąco. Postępowanie to nie jest bezpośrednio zależne od wartości przystosowania, lecz od rangi. Prawdopodobieństwo wyboru można opisać zależnością:

$$p_i = \frac{i}{\sum_{j=1}^n \cdot j} \quad (2.2)$$

Po ustaleniu wartości prawdopodobieństwa wybór rozwiązań przebiega analogicznie do selekcji ruletkowej.

Selekcja turniejowa w pierwszej fazie polega na losowym wyborze pewnej ilości osobników. Następnie osobniki te poddawane są ocenie na podstawie funkcji przystosowania. Turniej wygrywa osobnik z większą wartością przystosowania i kopiowany jest do następnej populacji.

W przypadku selekcji elitarniej w następnej populacji znajdzie się osobnik, który nie został poddany jakimkolwiek modyfikacjom. Strategia ta ma również za zadanie powielenie (do populacji potomnej) najlepszych osobników.

Dla konkretnego zagadnienia każdą z podstawowych metod selekcji można odpowiednio modyfikować [83].

Operatory: krzyżowanie, mutacja

Krzyżowanie ma na celu stworzenie osobnika potomnego na podstawie złożenia wartości genów osobników z pokolenia rodziców. Zatem operator krzyżowania (rekombinacji) przekazuje informacje do następnego pokolenia. Najczęściej w GA, w wyniku krzyżowania dwóch osobników rodzicielskich, powstają dwa osobniki potomne. Istnieje wiele metod krzyżowania:

- jednopunktowe,
- dwupunktowe,
- wielopunktowe,

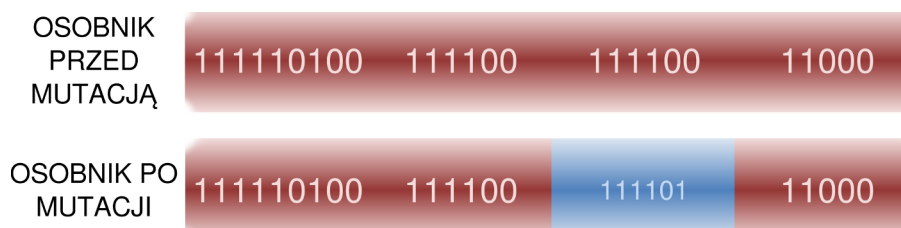
□ równomierne.

Spośród nich wybrano rekombinację jednopunktową, która polega na wylosowaniu punktu krzyżowania z określoną częstotliwością krzyżowania. Liczba ta zawiera się w zbiorze $\langle 1; n_{GA} - 1 \rangle$, dla którego n_{GA} określa liczbę genów w chromosomie. W wybranym miejscu rozcina się chromosomy rodzicielskie i łączy pierwszą część chromosomu jednego rodzica z drugą częścią chromosomu drugiego osobnika. Przykład krzyżowania jednopunktowego przedstawia rysunek 2.4.



Rys. 2.4. Przykład krzyżowania jednopunktowego

Mutacja chromosomu polega na zmianie losowo wybranego genu (mutacja jednopunktowa) z niewielkim prawdopodobieństwem, to znaczy częstotliwością mutacji. Przed przystąpieniem do mutacji zostaje określony jej regulamin. Opisuje on działanie, jakie należy wykonać na danym genie. Przykład mutacji jednopunktowej przedstawiony jest na rysunku 2.5.



Rys. 2.5. Przykład mutacji jednopunktowej

Nowa populacja

W wyniku działania operatorami powstaje nowa populacja - populacja potomna. Wykonuje się na niej czynności analogiczne do przeprowadzonych na populacji

rodzicielskiej. Do zbioru rozwiązań można dodać również osobniki z populacji rodzicielskiej, jak i wylosować osobniki nowe. Wszystkie te zbiory można traktować osobno lub łącznie – jako sumę. Warto w takim przypadku dokonać ewaluacji osobników z populacji poddanej zmianom. Osobniki powstałe w wyniku tych działań nie są znane, a wartość ich funkcji oceniającej nie jest jeszcze wyznaczona. Dopiero po określeniu ich jakości można je właściwie porównać z całością nowego zbioru [122].

Zakończenie obliczeń

Przytoczone czynności, od momentu generacji nowej populacji do etapu działania operatorów, powtarzane są wielokrotnie. Zakończeniem procesu optymalizacji jest znalezienie najlepszego osobnika. Jednak znalezienie odpowiedniego sposobu na zakończenie obliczeń jest trudne [11].

Jednym z prostszych wyznaczników zatrzymania algorytmu jest kryterium czasowe (działanie algorytmu przerywane jest w określonym czasie). W tym przypadku można założyć liczbę pokoleń powstających w algorytmie.

Innym sposobem jest obserwowanie wyników osiągniętych przez algorytm. Zatrzymanie GA następuje wówczas, gdy wartość funkcji oceny osiąga określony poziom lub nie różni się od wyników z poprzedzających ją pokoleń.

Inne sposoby zakończenia algorytmu zostały sformułowane w opracowaniu [11].

2.4. Opis układu geometrycznego, budowa osobnika

Przed przystąpieniem do budowy algorytmu genetycznego należy ustalić, w jaki sposób najtrafniej zamodelować analizowany problem. Wyniki uzyskane za pośrednictwem tego algorytmu są w dużej mierze zależne od ich modelu obliczeniowego [122]. Analizowany problem zostanie opisany poprzez dane dotyczące układu geometrycznego i parametrów kinematycznych z nim związanych. Modernizację należy wykonać, ponieważ istniejący układ nie spełnia założeń dotyczących maksymalnej prędkości przejazdu pociągów. Przyjęto także, że każdy układ projektowany musi spełniać ten warunek i jednocześnie odpowiadać obowiązującym przepisom [1, 7]. Proponowany algorytm obliczeniowy ma zapewnić spełnienie obu założeń [115].

W celu wykonania zadania optymalizacyjnego należy opierać się na pewnych wytycznych. Wstępnie przyjęto, że rozpatrywany układ geometryczny opisany jest jednoznacznie poprzez następujące parametry:

L_i	długości krzywych przejściowych,
R	promień łuku kołowego (promienie łuków kołowych),
ω	kąt zwrotu trasy,
δ	kąt środkowy pierwszego łuku (tylko w przypadku łuku koszowego),
H	wysokość istniejącego nasypu (lub głębokość przekopu),
V_{max}	prędkość maksymalną,
V_t	uśrednioną prędkość pociągów najwolniejszych kursujących na linii,
a_{dop}	wartość przyspieszenia odśrodkowego,
a_t	wartość przyspieszenia dośrodkowego,
i	pochylenie poprzeczne terenu,
i_{pod}	pochylenie podłużne terenu.

Na etapie założeń przyjęto, że nowo projektowany łuk kołowy z przyległymi krzywymi przejściowymi będzie opisany następującymi parametrami:

- R_M nowego promienia łuku,
- L_M nowych długości krzywych przejściowych,
- h_M nowej przechyłki.

Założono również, że układ projektowany będzie składał się z łuku kołowego i dwóch krzywych przejściowych o tych samych długościach. Kąt zwrotu trasy pozostanie taki sam jak w przypadku układu istniejącego. Długości krzywych przejściowych i promień łuku kołowego są ograniczone od dołu ich minimalnymi założonymi wartościami.

Po zakończeniu procesu optymalizacyjnego powinny zostać przedstawione dane, które mogą być przydatne do porównania rozwiązań wynikających z optymalizacji i tych obliczonych bez jej zastosowania:

- V_{max} maksymalna prędkość przejazdu pociągów dla projektowanych parametrów,
- w_{max} maksymalne odsunięcie układu istniejącego od projektowanego,
- RZ objętość robót ziemnych w m^3 ,
- FF wartość funkcji celu.

Zakłada się, że rozwiązania błędne powinny zostać wyeliminowane z procesu optymalizacji lub ich znaczenie zmniejszone poprzez zastosowanie odpowiedniej funkcji kary.

2.5. Kodowanie osobnika do GA

Przy budowie osobnika należy przyjąć pewne ograniczenia. Zakłada się minimalne i maksymalne wartości promienia oraz długości krzywej przejściowej. Przechyłka, zgodnie z *Rozporządzeniem Ministra* [1], powinna mieścić się w zakresie $\langle 0, 20, 25, 30, \dots, 135, 140, 145, 150 \rangle$ mm.

Kodując osobnika w pierwszej kolejności przyjmujemy minimalną długość krzywej, np. 40 m. Gen odpowiadający za długość krzywej przejściowej jest przyrostem w stosunku do wartości minimalnej. Kodowanie długości krzywej jest określone zależnością:

$$L_{zakM} = \frac{L_M - 40}{5} \quad (2.3)$$

gdzie:

- L_M projektowana długość krzywej przejściowej w m,
- 5 przyrost długości o 5 m.

Kodowanie wartości promienia opisane jest równaniem:

$$R_{zakM} = \frac{R_M - 500}{50} \quad (2.4)$$

gdzie:

- 50 przyrost długości o 50 m.

R_{ZakM}	L_{ZakM1}	L_{ZakM2}	h_{ZakM}
100	5	10	25

Tab. 2.1. Postać jawnie zakodowanego osobnika

$R_{ZakBinM}[\text{m}]$	$L_{ZakBinM1}[\text{m}]$	$L_{ZakBinM2}[\text{m}]$	$h_{ZakBinM}[\text{mm}]$
1100100	101	1010	11001

Tab. 2.2. Postać chromosomu zakodowanego binarnie

Przechyłka jest opisana przez konkretną liczbę od 0-27 (np. 0 odpowiada wartości 0; 1 odpowiada wartości 20; 2 odpowiada wartości 25 itd.). Przechyłkę zakodowaną można przedstawić zależnościami:

$$h_{zakM} = 0 \quad \text{dla } h = 0 \quad (2.5)$$

$$h_{zakM} = \frac{h - 15}{5} \quad \text{dla pozostałych} \quad (2.6)$$

Przykładowy, wstępnie zakodowany osobnik przedstawiony będzie w formie prezentowanej w tabeli 2.1.

Po rozkodowaniu osobnik będzie posiadał następujące cechy:

- promień łuku $R_M = 500 + 50 \cdot 100 = 5500$ m,
- długość pierwszej krzywej przejściowej $L_{M1} = 40 + 5 \cdot 5 = 65$ m,
- długość drugiej krzywej przejściowej $L_{M2} = 40 + 10 \cdot 5 = 90$ m,
- przechyłka $h_M = 15 + 25 \cdot 5 = 140$ mm.

W GA osobniki kodowane są binarnie, w związku z tym opisywany przykładowo osobnik jest zapisywany w kodzie zero-jedynkowym. Gen odpowiadający za promień łuku zakodowany w systemie dziesiętnym ma wartość 100. Zamiana na system binarny przedstawia się następująco:

$$\begin{array}{ll} 100 : 2 = 50 & \text{reszty } 0 \\ 50 : 2 = 25 & \text{reszty } 0 \\ 25 : 2 = 12 & \text{reszty } 1 \\ 12 : 2 = 6 & \text{reszty } 0 \\ 6 : 2 = 3 & \text{reszty } 0 \\ 3 : 2 = 1 & \text{reszty } 1 \\ 1 : 2 = 0 & \text{reszty } 1 \end{array}$$

Zatem 100 w systemie dziesiętnym jest równe 1100100 w systemie binarnym. Analogicznie postępuje się w przypadku pozostałych genów. Postać przykładowego chromosomu prezentuje tabela 2.2.

Po przeprowadzeniu wstępnych obliczeń okazało się, że przedstawiona w ten sposób postać osobnika często wykluczała rozwiązania lepsze, ponieważ przechyłka była dobierana na drodze losowania. Często więc nie mieściła się ona w zakresie

przechyłek możliwych do zastosowania w danym przypadku. Dodatkowo zauważono, że istnieje potrzeba zmniejszenia zaokrąglenia wartości promienia łuku kołowego i długości krzywych przejściowych. Finalnie, w rozpatrywanym przypadku osobnik jest opisany poprzez następujące parametry:

R_M projektowany promień łuku kołowego w m ,
 L_M projektowana długość krzywej przejściowej w m .

Wartość przechyłki zostanie zatem określona dla poszczególnych osobników w trakcie wykonywania końcowych obliczeń. Przykładowy chromosom powstały w ostatecznej wersji algorytmu został przedstawiony na rysunku 2.6.

Postać zakodowanego promienia i długości krzywej będzie wyznaczana z równań:

$$L_{zakM} = \frac{L_M - 40}{r} \quad (2.7)$$

i

$$R_{zakM} = \frac{R_M - 250}{r} \quad (2.8)$$

gdzie:

r dowolnie przyjęte zaokrąglenie, w opisywanej metodzie przyjęto zaokrąglenie do 1 m.



Rys. 2.6. Przykładowo wygenerowany chromosom w przyjętej metodzie

2.6. Określenie funkcji celu

Dobór odpowiedniej funkcji celu (w algorytmach genetycznych określanej jako FF – *fitness function*) ma kluczowe znaczenie w procesie optymalizacji. Często podstawowa postać funkcji celu ulega zmianie na etapie analizy generowanych rozwiązań. Na podstawie analiz dobrano taką funkcję celu, która będzie umożliwiała określenie najlepszych układów (z punktu widzenia przyjętych kryteriów). W przedstawionej metodzie wartość funkcji oceniającej jest maksymalizowana – jej postać ogólną przedstawia zależność:

$$FF = \frac{1}{KR} \quad (2.9)$$

gdzie:

KR argumenty funkcji celu.

Przy takim zapisie funkcji celu wartość funkcji będzie rosnąca dla malejących argumentów. Jeżeli więc wartości argumentów będą dotyczyły kosztu cyklu życia lub zakresu robót ziemnych w pracach modernizacyjnych, ich przyrost będzie wpływał

na zmniejszenie wartości funkcji celu. W omawianym przypadku postanowiono jednak również maksymalizować wartość prędkości maksymalnej, stąd:

$$FF = \frac{1}{KR_1 - KR_2} \quad (2.10)$$

Przy takiej postaci funkcji celu wzrost wartości argumentów KR_2 – w tym przypadku parametru prędkości maksymalnej – będzie powodował wzrost wartości funkcji celu. W omawianym przypadku ostateczna postać funkcji celu została przedstawiona za pomocą zależności [119]:

$$FF = \frac{1}{w_{LCC} \cdot LCC_{szyn} + w_{obj} \cdot |RZ| - w_{pred} \cdot V_{max_M}^2} \quad (2.11)$$

gdzie:

w_{LCC}	waga dotycząca kosztu cyklu życia szyn,
LCC_{szyn}	koszt cyklu życia szyn kolejowych,
w_{obj}	waga dotycząca objętości robót ziemnych,
RZ	objętość robót ziemnych w m^3 ,
w_{pred}	waga dotycząca prędkości,
V_{max_M}	prędkość możliwa do osiągnięcia dla danego układu geometrycznego w km/h .

W przedstawionym algorytmie obliczeniowym wartość funkcji celu jest maksymalizowana. Koszt cyklu życia szyn kolejowych, jak również zakres robót ziemnych powinien być jak najmniejszy, dlatego odpowiadające im kryteria znalazły się w mianowniku równania. Maksymalizowanie kryterium prędkości ujęto poprzez nadanie wartości ujemnej odpowiadającej jej wadze.

Rozdział 3

Problem kosztu cyklu życia szyn w łukach

Degradacja poszczególnych elementów nawierzchni toru kolejowego jest zagadnieniem bardzo złożonym, w które uwikłanych jest wiele czynników związanych między innymi z układem geometrycznym toru kolejowego, właściwościami trybologicznymi poszczególnych elementów nawierzchni, jak również z parametrami podłoża gruntowego, a także z właściwościami samych pojazdów szynowych. W pracy szczególną uwagę poświęcono zagadnieniu wpływu ukształtowania toru kolejowego na proces zużywania się szyn. Problem ten dotyczy przede wszystkim lokalizacji odcinków ułożonych w łukach poziomych o małych wartościach promienia. W wyniku kontaktu kół pojazdów z torem występuje oddziaływanie powodujące ubywanie materiału w główce szyny toku wewnętrznego bądź zewnętrznego. Takie zużycia szyn mogą powodować nadmierne osłabienie tego elementu konstrukcji nawierzchni kolejowej poprzez zmniejszenie parametrów geometrycznych przekroju poprzecznego, a także powodować mogą lokalne przekroczenia wartości szerokości toru. Dalsza eksploatacja szyn o nadmiernych zużyciach bocznych główki stwarza ryzyko związane z pojawieniem się kolejnych uszkodzeń nawierzchni, co w rezultacie może nawet doprowadzić do katastrofy kolejowej. Zatem w wyniku przekroczenia powyższych parametrów niezbędna jest wymiana szyn kolejowych w danych lokalizacjach, co w efekcie przyczynia się do poniesienia przez zarządcę infrastruktury kosztów związanych z eksploatacją i utrzymaniem danej linii kolejowej. Proces zużywania się szyn w czasie eksploatacji stanowi więc problem, który powinien być ujęty w planowaniu nakładów na utrzymanie linii kolejowych. W tymże rozdziale przedstawiono zjawisko zużycia szyn jako właściwe dla problematyki projektowania układów geometrycznych, a przede wszystkim poziomych łuków kołowych z krzywymi przejściowymi i rampami przechyłkowymi, gdzie kluczową rolę odgrywają parametry kinematyczne związane z ruchem pojazdów szynowych. W niniejszej pracy skupiono się na zagadnieniach dynamiki poruszającego się po łuku poziomym pojazdu oraz wyjaśniona została zależność pomiędzy przechyłką toru (w przekroju poprzecznym do osi toru) i postępowaniem procesu zużywania się główki szyny kolejowej. Omówiono siły kontaktowe występujące między obrzeżem koła pojazdu a tokiem szynowym, rozpatrując owe zagadnienie w nieinercyjnym układzie odniesienia [117].

3.1. Czynniki wpływające na zjawisko zużycia szyn

Proces zużywania się szyn w torze kolejowym powoduje znaczne skrócenie cyklu życia drogi szynowej. W rozważaniu ograniczono się do analizy zjawiska występującego w torach ułożonych w łukach poziomych. Zużycia szyn, obserwowane w eksploatowanym torze kolejowym na odcinkach ułożonych w łukach, można podzielić

na zużycia boczne i pionowe, których pomiar odnosi się odpowiednio do bocznej i górnej powierzchni główki szyny. Zużycia boczne rozwijają się najszybciej w odcinkach łukowych, dlatego poświęcono im uwagę w tym opracowaniu. Wiele czynników może wpływać na stopień bocznego zużycia główki szyny. Można do nich zaliczyć, przykładowo, czynniki związane z trybologią oraz z procesem wpisywania się zestawów kołowych pojazdu szynowego w układ geometryczny toru. Zatem rola parametrów geometrycznych jest w omawianym zagadnieniu kluczowa. Odpowiednie ukształtowanie układu torowego może znacznie zredukować stopień i intensywność zużywania się szyn położonych w łukach [117].

Pojazd szynowy będący w ruchu stale oddziałuje na główkę szyny pewną wypadkową siłą wynikającą z grawitacji oraz z procesu wpisywania się zestawu kołowego w tor. Kontakt koła i szyny realizowany jest na niewielkim obszarze styku, jednak układ geometryczny koło-szyna podczas ruchu pojazdu może być różnorodny i poza toczeniem się kół występuje również tarcie pomiędzy boczną powierzchnią główki szyny a obrzeżem koła. W efekcie tarcia zużyciu ulegają zarówno szyna, jak i koło pojazdu. Do czynników mających wpływ na zużycie materiału kół i szyn możemy zaliczyć:

- parametry geometryczne toru i zestawu kołowego,
- właściwości materiałowe,
- procesy trybologiczne,
- charakterystyki trakcyjne lokomotyw,
- stopień nierówności geometrycznych toru.

Wielkość zużycia bocznego oraz skala zjawiska związane są bezpośrednio z kosztami utrzymania linii kolejowych. W związku z tym problem ten jawi się jako ważny. W wyniku czego bardzo często poddawany jest analizom o charakterze doświadczalnym oraz numerycznym, zarówno w kraju [12, 14, 19, 21, 24, 25, 31, 34, 55, 67, 68, 70, 123], jak i za granicą [10, 44, 79, 92, 93, 98, 101, 104, 135].

3.2. Ruchu pojazdu szynowego po łuku

Rozważając ruch jednostajny po okręgu, zgodnie z zasadami dynamiki, zakłada się, że ruch ten wymaga permanentnego działania niezrównoważonej siły (w przeciwieństwie do ruchu jednostajnego po linii prostej). Wartość liczbowa tej siły (tzw. siły dośrodkowej) wyrażona jest następującą zależnością:

$$F_d = m \cdot \frac{V^2}{R} \quad (3.1)$$

gdzie:

- F_d siła dośrodkowa w N,
- m masa pojazdu.

Rozpatrując ruch pojazdu szynowego po okręgu w układzie tzw. inercjalnym (nieprzyspieszającym), kierunek siły dośrodkowej jest zgodny z wektorem przyspieszenia pojazdu (skierowanym zawsze do środka łuku). Zatem wektor siły dośrodkowej jest prostopadły do wektora prędkości liniowej pędzącej masy. Siła dośrodkowa działająca na pojazd poruszający się po łuku poziomym bez przechyłki jest reakcją

na siłę wynikającą z nacierania koła pojazdu na zewnętrzny tok szynowy [105]. Wynika z tego, że w przypadku braku przechyłki na łuku procesowi zużycia bocznego podlegała będzie jedynie szyna toku zewnętrznego. W tym przypadku do teoretycznego opisu mechanizmu powstawania zużycia bocznego główki szyny nie jest konieczne uwzględnianie siły ciężkości działającej na pojazd (pod warunkiem, że zużycie pionowe i boczne potraktuje się jako procesy niezależne). Założenie to znacznie ułatwi analizę tych procesów.

Przypadek braku przechyłki skutkuje tzw. niezrównoważonym przyspieszeniem odśrodkowym. Przyspieszenie to działa na osoby lub obiekty znajdujące się w poruszającym się po łuku pojeździe, jednak rozpatruje się je względem układu, jaki stanowi poruszający się pojazd. Zatem przyspieszenie odśrodkowe w układzie nieinercyjnym nie wynika z działania siły. Oznacza to, że w układzie inercyjnym przyspieszenie odśrodkowe nie występuje, a co za tym idzie – nie występuje również tzw. siła odśrodkowa odczuwana przez pasażerów pociągów poruszających się po łuku. Konsekwencją jest fakt rozpatrywania siły dośrodkowej w układzie sił działających na pojazd (układzie inercyjnym) oraz siły odśrodkowej (pozornej) w układzie sił działających na pasażera czy ładunek (układzie nieinercyjnym) [117].

3.3. Wpływ przechyłki na zjawisko zużycia bocznego szyn kolejowych

Zgodnie z założeniami teoretycznymi przechyłkę wyznaczyć można z zależności:

$$h_{teor} = \frac{sV_{teor}^2}{gR} \quad (3.2)$$

gdzie:

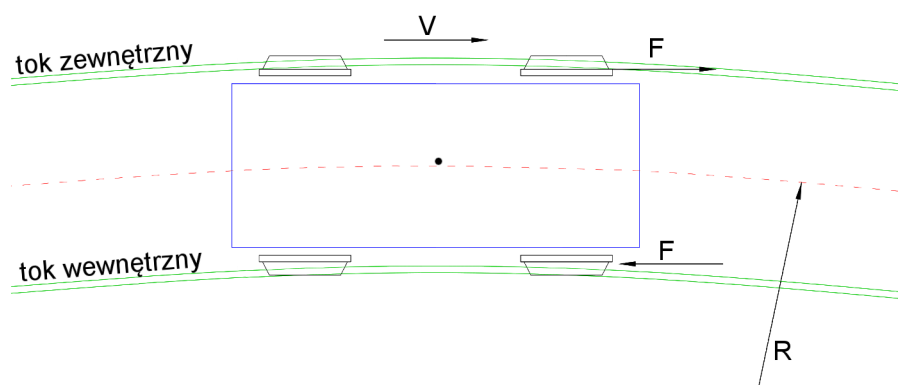
V_{teor} – teoretyczna stała wartość prędkości w km/h .

Przechyłka w torze projektowana jest w celu zrównoważenia pozornej siły odśrodkowej oddziałującej na pasażera w układzie nieinercyjnym. Siłę tę równoważy pozioma składowa grawitacji, która w tym przypadku jest różna od zera. Jednak pojawienie się przechyłki skutkuje tym, że w ujęciu statycznym w układzie inercyjnym pojazd nierównomiernie oddziałuje kołami na toki szynowe. Wynika to z faktu pojawienia się momentu obrotowego pod wpływem siły ciężkości, która w przypadku pochylonego pojazdu nie będzie działać w jego osi. Tymczasem w ujęciu dynamicznym moment ten nie występuje dlatego, że siła grawitacji wykonuje pracę pokonania bezwładności masy, która nie chce samoistnie zmienić kierunku swojego wektora pędu [117].

Rozpatrywany przypadek dotyczy pojazdu poruszającego się po torze z daną przechyłką h i stałą prędkością liniową V_p . Z równania (3.1) wynika, że aby pojazd poruszał się po łuku o promieniu R , musi działać na niego konkretna wartość siły dośrodkowej. Jeżeli prędkość liniowa zostanie zwiększona, wówczas pojazd dążył będzie do zwiększenia promienia swojej trajektorii. Zatem aby promień został zachowany, wartość siły dośrodkowej musi zostać zwiększona. Jako że siła grawitacji nie zależy od prędkości, przyrost siły F_d musi wynikać z dodatkowego oddziaływania więzów. Oddziaływanie to jest siłą kontaktu obręczy koła z szyną. Zatem całkowita siła dośrodkowa zmieniająca kierunek wektora pędu pojazdu

składa się z siły grawitacji oraz siły kontaktu koło-szyna. W przypadku, gdy pojazd porusza się po przechyłce zaprojektowanej dla danej prędkości projektowej V_{max} , tj. po przechyłce teoretycznej, siła grawitacji jest wystarczająca do tego, aby pojazd poruszał się po promieniu toru R , a więc odpowiednia jej składowa stanowi siłę dośrodkową działającą na pojazd. W takim przypadku nie postępuje proces bocznego zużycia toków szynowych, a koła pojazdu oddziałują na toki szynowe w sposób równomierny. Taka sytuacja ma miejsce, gdy rozpatrywany jest teoretyczny ruch punktu materialnego.

W praktyce zaprojektowana przechyłka nie jest odtworzona w idealny sposób, a prędkość przejazdu nie zawsze jest równa zaprojektowanej prędkości. Mimo że wartość przechyłki nie jest jedynym czynnikiem decydującym o wartości zużycia bocznego, to dopasowanie prędkości do przechyłki teoretycznej może być korzystne z uwagi na komfort jazdy pasażera i eksploatację toru. Jednak sytuacja taka może mieć miejsce tylko w przypadku rozważań teoretycznych punktu materialnego poruszającego się po łuku z zadaną prędkością. Konieczne jest także, aby przechyłka teoretyczna nie stanowiła zagrożenia dla stateczności pojazdu w przypadku zatrzymania się najcięższego pojazdu na łuku, a to wymaga projektowania odpowiednio dużych promieni łuków.



Rys. 3.1. Ruch pojazdu po łuku

Analizując hipotetyczną sytuację, w której pojazd porusza się po torze położonym w łuku ze zmienną przechyłką. W świetle równania (3.2) pojazd dążył będzie do ruchu po coraz mniejszym promieniu. Aby promień trajektorii został zachowany, musi pojawić się reakcja więzów, która przeciwdziałać będzie wzrastającej wartości siły dośrodkowej (składowej siły grawitacji, równoległej do płaszczyzny toru). Reakcja ta wynika z parcia koła pojazdu na wewnętrzny tok szynowy. Zatem siła dośrodkowa działająca na pojazd wynosi:

$$F_d = F \cdot g \sin \varphi - F_r \quad (3.3)$$

gdzie:

- F_r siła na styku obręczy koła i bocznej powierzchni główki szyny w toku wewnętrznym w N ,
- φ kąt nachylenia toru do poziomu w $^\circ$.

i pod jej działaniem pojazd zachowuje trajektorię po promieniu R . Korzystając z zależności (3.1) siła nacisku obręczy koła na boczną krawędź główki szyny wynosi:

$$F_r = F \cdot g \sin \varphi - \frac{mV_p^2}{R} \quad (3.4)$$

a jej kierunek jest równoległy do płaszczyzny toru. Siła ta jest odpowiedzialna za zużycia boczne wewnętrzznego toku szynowego.

W przypadku, gdy przechyłka będzie się zmniejszać w stosunku do przechyłki teoretycznej, występuje sytuacja odwrotna, tj. pojazd dąży do ruchu po trajektorii o coraz większym promieniu. Wynika to bezpośrednio ze zmniejszania się odpowiedniej składowej grawitacji, tj. $mg \sin \varphi$. Stała wartość siły dośrodkowej spowodowana jest wzrostem wartości reakcji działającej na zewnętrzne koło pojazdu. Siła ta wyrażona jest zależnością:

$$F_r = \frac{mV_p^2}{R} - F \cdot g \sin \varphi \quad (3.5)$$

Rozważania te pokazują wzajemną relację pomiędzy prędkością, przechyłką i zużyciem bocznym obydwu toków szynowych. Zatem projektowanie układów torowych powinno być również skoncentrowane na problemach związanych z trwałością nawierzchni.

Prowadzenie ruchu mieszanego po torze położonym w łuku poziomym powoduje, że niemożliwe jest wyeliminowanie zużyć bocznych w obydwu tokach szynowych. O ile dla ruchu pojazdów pasażerskich możliwe jest wykonanie przechyłki zbliżonej do teoretycznej, to pojawienie się na tym torze znacznie wolniejszych pociągów towarowych może spowodować zużycia również na wewnętrznym toku szynowym. Ponadto może również wystąpić niebezpieczeństwo utraty stateczności poprzecznej pociągów towarowych. W literaturze opisywane są również przypadki, w których stosowanie nadmiaru przechyłki w celu zmniejszenia intensywności zużycia szyn dawało negatywne skutki na przykład w postaci zużycia falistego na toku wewnętrznym i nadmiernego zużywania się toku zewnętrznego [67].

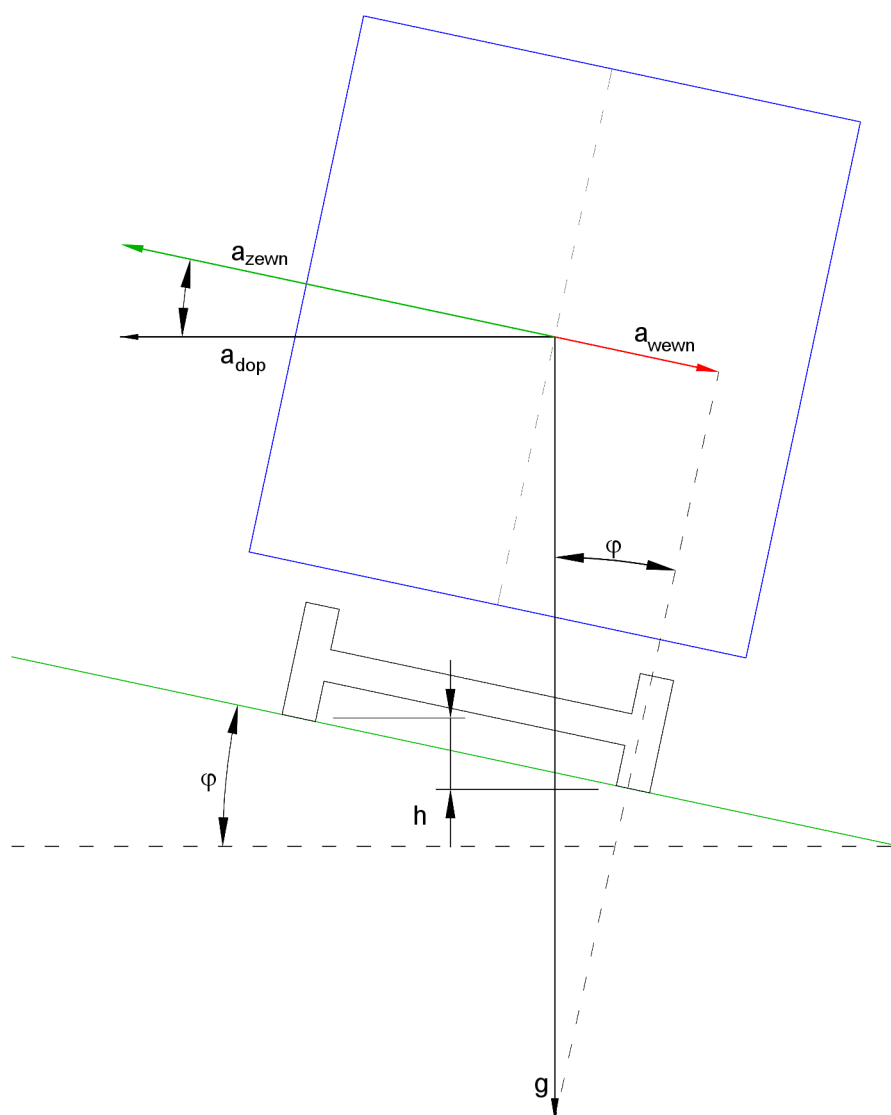
Projektowana przechyłka została ograniczona do wartości maksymalnej h_{max} (w Polsce jest to wartość 150 mm). Ograniczenie to powinno zapewnić stateczność poprzeczną pojazdu, dla którego przechyłka jest dużo większa niż przechyłka teoretyczna (pociągi towarowe). Przechyłkę toru można opisać równaniem:

$$h = s \sin \varphi \quad (3.6)$$

Przekształcając równanie (3.2) i uwzględniając zależność (3.6), otrzymujemy wyrażenie na przechyłkę maksymalną, przy której dopuszcza się oddziaływanie obrzeża koła na wewnętrzny tok szynowy F_r . Od akceptowanej wielkości tego oddziaływania zależy zatem wartość przechyłki h_{max} . Wyrażenie to ma następującą postać:

$$h_{max} = \frac{s}{g} \cdot \frac{V_t^2}{R} + \frac{s}{mg} \cdot F_r = 11,8 \frac{V_t^2}{R} + \frac{s}{g} a_t = 11,8 \frac{V_t^2}{R} + 153 a_t \quad (3.7)$$

W praktyce projektowej nie określa się dopuszczalnej wartości siły F_r , lecz przyspieszenie odpowiadające tej sile (wyeliminowanie czynnika masy). Wartości dopuszczalne przyspieszeń określone zostały na drodze analiz doświadczalnych i mają swoje odzwierciedlenie w dokumentach prawnych dotyczących projektowania i eksploatacji nawierzchni dróg szynowych [127].



Rys. 3.2. Przyspieszenia działające na pojazd na łuku kołowym [65]

Z rozważań tych wynika, że przechyłka teoretyczna obliczona dla ruchu pociągów pasażerskich w większości przypadków będzie większa niż dozwolona przechyłka h_{max} . Wywołuje to sytuację, w której pociągi pasażerskie będą powodowały zużycie toku zewnętrznego.

Oprócz przechyłki maksymalnej wprowadza się również pojęcie przechyłki minimalnej. Przechyłka minimalna wynika z układu sił działających na pasażera względem poruszającego się pojazdu (układ nieinercjalny). Zauważmy, że już wprowadzenie przechyłki maksymalnej mniejszej od przechyłki teoretycznej (dopuszczalne niezerównoważone przyspieszenie poprzeczne) powoduje niekomfortowe wrażenia pasażera podczas jazdy, tj. odczuwanie pozornej siły poprzecznej do kierunku jazdy. Sytuacje projektowe wymuszają niekiedy kolejne zmniejszanie wartości przechyłki (skracanie krzywej przejściowej). Nadmierne zmniejszenie przechyłki powoduje nieakceptowane przez pasażera pojazdu przeciążenia. Zatem przechyłka minimalna ogranicza odczuwalne przez pasażera przyspieszenie względem pojazdu [117].

Również z poziomu układu inercjalnego zjawisko to jest niekorzystne z uwagi na zużywanie się szyny zewnętrznej. Procedura wyznaczenia wartości przechyłki minimalnej będzie przedstawiona z poziomu układu inercjalnego. Równanie (3.5) przedstawia układ sił działających na pojazd, gdy przechyłka jest mniejsza od przechyłki teoretycznej. Przekształcając to równanie i wprowadzając zależność (3.6) otrzymujemy wyrażenie na przechyłkę minimalną, w którym F_r jest wartością większą od zera. Zależność tę przedstawiono w równaniu:

$$h_{min} = \frac{s}{g} \cdot \frac{V_{max}^2}{R} - \frac{s}{mg} \cdot F_r = 11,8 \frac{V_{max}^2}{R} - \frac{s}{g} a_{dop} = 11,8 \frac{V_{max}^2}{R} - 153a_{dop} \quad (3.8)$$

gdzie:

h_{min} minimalna wartość przechyłki w *mm*.

W praktyce dużo ważniejszym czynnikiem od siły powodującej zużycie szyny zewnętrznej jest komfort jazdy podróżujących. Zatem zamiast określać siłę reakcji, ustala się przeciążenie, które jest akceptowane przez pasażera (w układzie nieinercjalnym) [117].

Przy projektowaniu przechyłki w warunkach ruchu niejednorodnego dąży się do sytuacji, gdzie przechyłka znajduje się wewnątrz przedziału określonego w układzie nierówności przedstawionym w formule [20]:

$$h_{min} = 11,8 \frac{V_{max}^2}{R} - 153a_{dop} \leq h \leq h_{max} = 11,8 \frac{Vt^2}{R} + \frac{s}{g} a_t = 11,8 \frac{Vt^2}{R} + 153a_t \quad (3.9)$$

3.4. Ocena kosztu cyklu życia LCC

Pierwsze próby zastosowania metod oceny kosztów cyklu życia LCC (akronim od słów Life Cycle Costing) w przemyśle kolejowym rozpoczęto w Szwecji na początku lat osiemdziesiątych [35]. W roku 1986 Adtranzi Swedish State Railways podpisali kontrakt na zastosowanie metod oceny kosztu cyklu życia dla szwedzkiego pociągu dużych prędkości X2000 [63, 108]. Założono, że dla tego przypadku metoda musi spełniać wymogi RAM/LCC. Wymogi RAM, które powinny być przestrzegane na każdym etapie cyklu życia to *R* – Reliability, czyli niezawodność, *A* – Availability, czyli dyspozycyjność (dostępność), *M* – Maintainability, czyli naprawialność (podatność na utrzymanie). W tym okresie analiza LCC dla przemysłu kolejowego była wykorzystywana głównie do oceny pojazdów kolejowych. Podejście to na przestrzeni lat ulegało zmianie i do oceny taboru coraz częściej dołącza się drogi szynowe jako całość (total Railway System). Również forma finansowania projektów buduj - eksploatuj - przekazuj BOT (akronim od słów Build Operate and Transfer) zmusza wykonawców (dostawców) do całościowego traktowania systemu kolei, jak również do stosowania metod oceny kosztu cyklu życia. W 1991 roku została założona organizacja UNIFE, której celem miało być usprawnienie działania podzielonych i zróżnicowanych zarządów kolejowych w obrębie Europy. System kolei został zdefiniowany jako wspólny rynek, oparty na jednolitych standardach. Zaczęto również stosować pojęcie Total Railway System [64], oznaczające traktowanie wszystkich elementów systemu jako całości. Przedstawione założenia spowodowały przeniesienie analiz LCC na drogę szynową.

3.5. LCC w świetle przepisów

Obowiązującym przepisem ściśle związanym z problematyką LCC jest Standard Międzynarodowy *IEC 60300*. W Polsce zaś jest to składająca się z trzech części norma *PN-EN 60300*, która koncentruje się na zagadnieniach zarządzania niezawodnością [128]. W pracy skoncentrowano się głównie na części trzeciej i sekcji trzeciej wspomnianych przepisów *PN-EN 60300-3-3*. Wspomniana część jest przewodnikiem zastosowań traktującym o szacowaniu kosztu życia. Chociaż koszty eksploatacji składają się z wielu elementów, które przyczyniają się do tych kosztów, w omawianym opracowaniu zwrócono szczególną uwagę na koszty powiązane z niezawodnością wyrobu. Opracowano tamże modele kosztu cyklu życia i podano wytyczne dotyczące prowadzenia analiz w tym zakresie [128]. W normie opisano następujące elementy związane z analizą LCC:

- cele,
- fazy,
- koncepcje,
- proces szacowania kosztów cyklu życia wyrobu.

Celem analiz jest niewątpliwie ocena całkowitego kosztu nabycia, posiadania i likwidacji wyrobu. Zadaniem mającym zasadnicze znaczenie w tego typu obliczeniach jest wyznaczenie głównych faz cyklu życia wyrobu. Zgodnie z normą *EN 60300-3-3* [2] wyróżnia się następujące fazy cyklu życia wyrobu:

- koncepcja i definiowanie,
- projektowanie i rozwój,
- wytwarzanie,
- instalacja,
- użytkowanie i obsługiwane,
- likwidacja.

Dla każdej z wymienionych faz podane są przykładowe (typowe) koszty. Do typowych kosztów fazy koncepcji i definiowania zaliczono m.in. badanie rynku, zarządzanie przedsięwzięciem, analizę koncepcji i projektu systemu czy też przygotowanie specyfikacji wymagań dla wyrobu. W fazie projektowania i rozwoju można wyróżnić koszty związane z zarządzaniem przedsięwzięciem, projektowaniem, technologią, ochroną środowiska itp. W przypadku wytwarzania i instalacji koszty zostały podzielone na dwie zasadnicze grupy. Są to koszty powtarzające i niepowtarzające się na tym etapie. Podobny podział występuje w przypadku fazy użytkowania i obsługi. Koszty, które są ponoszone w czasie życia wyrobu to na przykład koszty użytkowania, obsługi, wspomagania czy wyposażenia pomocniczego. Każdy z wymienionych kosztów można podzielić na dwie zasadnicze grupy. Przykładowo koszt nie powtarzający się, związany z użytkowaniem to koszt wstępnego szkolenia personelu lub wykonania dokumentacji. Natomiast powtarzającym się może być koszt robocizny, materiałów eksploatacyjnych. W fazie ostatniej, tj. likwidacji, można wyróżnić koszty wycofania z eksploatacji i likwidacji czyli zakończenia eksploatacji, wycofania z eksploatacji, rozmontowania i usunięcia, recyklingu czy też bezpiecznej likwidacji [120].

Podobne podejście zostało przedstawione w wytycznych organizacji UNIFE [100]. Zgodnie z zapisami, koszt likwidacji jest bardzo często lekceważony w analizach

skupionych na użytkowniku [40]. Dla produktów użytkowych recycling odpadów może być znaczącym kosztem w całym cyklu życia, jednak dla linii kolejowych nie ma on większego znaczenia, gdyż większość zużytych elementów nawierzchni nadaje się do prostego przetworzenia i stanowić może pełnowartościowy produkt handlowy. Przy modernizacji linii kolejowej przedstawionym powyżej fazom cyklu życia można przyporządkować konkretne czynności [128]. Przykładowo:

Koncepcja i definiowanie:

- inwentaryzacja i ocena istniejącej drogi szynowej,
- określenie parametrów eksploatacyjnych,
- studium wykonalności,
- opracowanie specyfikacji wykonania i odbioru robót.

Projektowanie i rozwój:

- wykonanie projektów budowlanych i wykonawczych,
- wyłonienie wykonawców.

Wytwarzanie:

- wytworzenie elementów składowych nawierzchni,
- inżynieria przemysłowa,
- prefabrykacja elementów.

Instalowanie:

- zakup gruntu,
- budowa zaplecza technicznego,
- szkolenia,
- transport,
- wbudowanie elementów nawierzchni na placu budowy,
- kontrola jakości wykonania robót,
- odbiory powykonawcze.

Użytkowanie i obsługiwanie:

- szkolenie personelu,
- prace prewencyjne,
- diagnostyka,
- naprawy bieżące,
- likwidacja awarii, wypadków, wykolejeń.

Likwidacja:

- rozmontowanie i usunięcie nawierzchni,
- transport,
- recycling i złomowanie,
- składowanie odpadów niebezpiecznych.

Koszty cyklu życia można zagregować do trzech głównych grup:

Według normy EN 60300-3-3 [2]:

$$LCC = K_{uzyskania} + K_{posiadania} + K_{likwidacji} \quad (3.10)$$

gdzie:

$K_{uzyskania}$	koszty uzyskania,
$K_{posiadania}$	koszty posiadania,
$K_{likwidacji}$	koszty likwidacji.

Według modelu UNIFE [40]:

$$LCC = K_{inwestycyjny} + K_{operacyjne} + K_{utrzymania} \quad (3.11)$$

gdzie:

$K_{inwestycyjny}$	koszty inwestycyjne,
$K_{operacyjne}$	koszty operacyjne,
$K_{utrzymania}$	koszty utrzymania.

3.6. Definicja trwałości szyn kolejowych

Zdatność eksploatacyjna całej nawierzchni kolejowej zależy od wszystkich jej części składowych, z których każda pełni w torze inną rolę i ma różne znaczenie. Szyny kolejowe są elementem, którego złamanie prowadzi do utraty zdatności toru do eksploatacji. Jeżeli zjawisko to jest nagłe, może powodować groźne skutki z uwagi na bezpieczeństwo poruszających się pociągów [15]. Ocena trwałości eksploatacyjnej szyn ma więc kluczowe znaczenie dla racjonalnego gospodarowania nimi, jak i bezpieczeństwem ruchu pociągów [94]. Dobór odpowiedniego typu szyny kolejowej powinien być poprzedzony analizą uwzględniającą szereg czynników mających wpływ na jej trwałość, m.in. obciążenie całkowite na linii, obciążenie osiowe przenoszone przez szyny, warunki eksploatacyjne, lokalizacja. W ocenie tej pomocna może okazać się znajomość zjawisk występujących na liniach o różnych warunkach eksploatacyjnych, jak i opracowanie odpowiednich metod prognozowania uszkodzeń szyn [15].

Trwałość szyny kolejowej można zdefiniować jako czas, okres jej życia (użytkowania). Trwałość jest więc wielkością, którą można wyrazić w jednostkach czasu lub przeniesionego obciążenia. Możliwe jest uproszczone jej wyznaczenie poprzez określenie dopuszczalnego zużycia pionowego szyny oznaczanego zgodnie z *Id-1* [127] dz_p . Wartość średniej trwałości można wyznaczyć korzystając z zależności [15]:

$$T = dz_p A_z \quad (3.12)$$

gdzie:

A_z	odporność szyn na zużycie w funkcji obciążenia w Tg/mm ,
dz_p	dopuszczalne zużycie pionowe główki szyny w mm .

Wartość odporności szyn na zużycie jest problematyczne a w literaturze założono, że może mieścić się w granicach od 5 do 40 Tg/mm [29]. Schramm [102], określając wspomnianą wartość, uwzględnia silne zużycie główki szyny oraz fakt, że jej część ulega rdzewieniu. Zakłada również, że jest to wartość dla maksymalnego granicznego obciążenia główki na sieci kolejowej w Niemczech (DB) i podaje $A_z = 12 Tg/mm$. Podobnie określono trwałość szyn w jednostce czasu:

$$T = \frac{dz_p \cdot A_z \cdot km}{B_z} \quad (3.13)$$

gdzie:

km łączna długość toru włącznie z rozjazdami w km ,
 B_z obciążenie eksploatacyjne sieci w $Tg \cdot km/rok$.

Zaletą wspomnianych obliczeń jest łatwość oszacowania wyników, jednak zakłada się tutaj dość duże przybliżenia [15].

Często jednak uwzględnia się fakt, że dopuszczalna wartość zużycia powiązana jest ze zużyciem bocznym; można to zauważyć w obowiązujących przepisach, np.: *Instrukcji Id-1* [127]. W niektórych publikacjach przedstawiono również sposób, w jaki można wyznaczyć powierzchnię starcia główki szyny. Opierając się na pracach Sachunjanca [126]:

$$\beta = 1,3\lambda cK \frac{P_k}{r_k} (1 + 9\delta_k^2) \quad (3.14)$$

gdzie:

β_z starta powierzchnia w przekroju poprzecznym główki w mm^2 ,
 λ funkcja uwzględniająca krzywizny linii kolejowej,
 c_z funkcja zależna od konstrukcji nawierzchni,
 K_z współczynnik wyrażający jakość szyn $K_z = K_{0z}K_{1z}$,
 K_{0z} współczynnik wyrażający jakość technologii produkcji szyn ($K_{0z} = 1$ dla szyn bez obróbki cieplnej i $K_{0z} = \langle \frac{1}{2}; \frac{2}{3} \rangle$ dla szyn poddanych obróbce cieplnej),
 K_{1z} współczynnik zależny od składu chemicznego stali,
 P_k statyczny nacisk koła na szynę równy 10 kN,
 r_k promień koła w cm ,
 δ_k względny poślizg koła po szynie w %.

Wartość funkcji uwzględniającej krzywizny na linii kolejowej opisywana jest zależnościami – odpowiednio – dla całego łuku, toku zewnętrznego i wewnętrznego (przy założeniu braku smarownic w torze):

$$\lambda \approx \frac{900}{R} + \frac{10^5}{R^2} \quad (3.15)$$

$$\lambda_z \approx \frac{900}{R} + \frac{2 \cdot 10^5}{R^2} \quad (3.16)$$

$$\lambda_w \approx \frac{900}{R} \quad (3.17)$$

Dla łuków o promieniu $R \geq 1000m$ wartość omawianej funkcji jest równa:

$$\lambda = \lambda_z = \lambda_w = 1 \quad (3.18)$$

Wartość funkcji zależnej od konstrukcji nawierzchni opisywana jest zależnością:

$$c_z = 0,5 + 1,16 \cdot 10^5 \frac{k}{U} \quad (3.19)$$

gdzie:

k_z współczynnik względnej sztywności podłoża i szyny,
 U_z moduł sprężystości nawierzchni.

Współczynnik zależny od składu chemicznego stali uwarunkowany jest zawartością węgla i określany zależnościami:

$$K_{1z} = 1 + 1,4(0,76 - C) \quad \text{dla} \quad C = 0,76 \div 0,66 \quad (3.20)$$

$$K_{1z} = 1,14 + 4,56(0,66 - C) \quad \text{dla} \quad C = 0,66 \div 0,63 \quad (3.21)$$

$$K_{1z} = 1,28 + 35(0,63 - C) \quad \text{dla} \quad C = 0,63 \div 0,4 \quad (3.22)$$

W metodzie tej wskazano, że na trwałość szyn ma wpływ więcej niż jeden czynnik. Niestety, możliwość zastosowania przytoczonych zależności jest ograniczona z uwagi na brak danych dotyczących omówionych współczynników wykorzystywanych w tych obliczeniach [15]. Opisane trzy metody obliczeń nie uwzględniają jednak wszystkich ważnych czynników przyczyniających się do skrócenia cyklu życia szyny w torze. Pomijana jest również kwestia szybszego zużycia stali szynowej w początkowej fazie jej użytkowania.

W swojej książce M. Bałuch [25] przytacza jeszcze jedną empiryczną zależność przedstawioną przez Šachunjanca [126], a odnoszącą się do końcowego stadium degradacji. Przedstawia ona trwałość szyny w funkcji ich masy q :

$$T = \beta_T \sqrt{q^3} \quad (3.23)$$

gdzie:

q masa metra bieżącego szyny,
 β_T współczynnik $\beta_T = 0,95$.

Zgodnie z tą zależnością szacowana trwałość szyny 60E1 wynosiłaby 445 Tg, co w ogólnej ocenie wydaje się być wartością zbyt małą. W polskich opracowaniach [18, 25] pojawiają się również zależności na oszacowanie trwałości szyn, które opierają się na liczbie pojedynczych wymian na 1 km toru. Dla szyn 60E1:

$$k_{wsz} = 0,2 \left(\frac{T}{145} \right) - 0,2 \quad (3.24)$$

gdzie:

k_{wsz} liczba pojedynczych wymian szyn na 1 km toru.

Funkcja ta odpowiada, zgodnie z opracowaniem [18], eksploatacyjnym warunkom uśrednionym. Opierając się na tej zależności dla $k_{wsz} = 6$ otrzymujemy trwałość szyny 60E1 równą 500 Tg.

Jak zauważono w pracy [18], na trwałość szyn wpływa wiele czynników zarówno konstrukcyjnych jak i eksploatacyjnych. Niestety, ich wpływ w dużej mierze jest trudny do jednoznacznego określenia. Dlatego w ocenie trwałości zakłada się pewne prawdopodobieństwo uzyskania odpowiedniej wartości trwałości elementu. Wartość trwałości nominalnej przedstawiona została następująco:

$$T_\mu = \beta_\mu T_m + \frac{\log \left(\frac{\gamma_\mu (1-\mu)}{\mu} \right)}{\log \alpha_\mu} \quad (3.25)$$

gdzie:

- T_m trwałość średnia (odpowiadająca prawdopodobieństwu 0,5),
 $\alpha_\mu, \beta_\mu, \gamma_\mu$ wartości stałe charakteryzujące dany typ szyny,
 μ prawdopodobieństwo trwałości szyn.

W podanej metodzie przyjęto, że w zależności od klasy toru można podać różne prawdopodobieństwo trwałości szyn. Nie uwzględniono jednak w obliczeniach niektórych szczególnych cech konstrukcyjno–eksploatacyjnych.

3.7. Dobór szyn w zależności od promienia łuku

Koszt cyklu życia (LCC) dla szyny kolejowej obejmuje koszty od momentu jej powstania aż do momentu demontażu [35]. Zatem w kosztach tych uwzględniane są zarówno koszty inwestycyjne i operacyjne, jak i te związane z ich utrzymaniem. Dla zagregowanej propozycji modelu *UNIFE* należy rozpatrywać przynajmniej następujące czynności:

- Koszty inwestycyjne:
 - ◊ zakup szyn o określonych parametrach.
- Koszty operacyjne:
 - ◊ montaż szyn,
 - ◊ spawanie lub zgrzewanie,
 - ◊ szlifowanie wstępne.
- Koszty utrzymania:
 - ◊ wykrywanie wad,
 - ◊ szlifowanie szyn,
 - ◊ napawanie,
 - ◊ wymiana uszkodzonego fragmentu szyny.

W przypadku inwestycji polegającej na budowie toru w łuku zdecydowano się na rozpatrywanie kosztu cyklu życia według metody łączącej założenia normowe i *UNIFE*. Zrezygnowano z obliczeń kosztu likwidacji inwestycji, przyjmując że materiał szyn usuwany z odcinka trasy nadawać się będzie do ponownego przetworzenia lub wykorzystania w innym miejscu. Połączono pozycje kosztu inwestycyjnego i operacyjnego w pozycję kosztu inwestycyjnego. W obliczeniach koszty utrzymania zależą od wartości zużycia pionowego i bocznego szyn. Modele obliczeniowe dotyczące degradacji szyn opierają się na wynikach badań projektu *INNTRACK* [59, 60]. Na tej podstawie określone są koszty utrzymania czyli koszty szlifowania i wymiany szyn. Z uwagi na ciągłość eksploatacji toru jako całości nie można jednoznacznie określić długości życia za pomocą maksymalnego okresu eksploatacji poszczególnych elementów. Założono więc, że w omawianej funkcji celu do obliczeń przyjmuje się trzydziestoletni cykl życia.

W przyjętym modelu okres eksploatacji szyn zależy od promienia łuku. Dla łuków o promieniu poniżej 800 m obliczenia są wykonywane dla szyn *R350HT*, powyżej tej wartości dla szyn *R260*. We wszystkich rozwiązaniach, w których promień osiąga wartość poniżej 600 m, zakłada się dodatkowe współczynniki (zależne od promienia), pomniejszające wartość funkcji celu. Przyczyną takiego podejścia jest fakt, że zgodnie z przepisami [127] takie przypadki należy traktować jako niekorzystne z uwagi na utrzymanie.

Obliczanie kosztu cyklu życia szyn kolejowych będzie można opisać matematycznie za pomocą następującego równania:

$$LCC_{szyn} = K_{inw} + K_{utr} \quad (3.26)$$

gdzie:

K_{inw} koszty inwestycji,
 K_{utr} roczny koszt utrzymania toru w zł/m.

Koszt inwestycyjny składa się z kosztów zakupu oraz wbudowania elementów nawierzchni kolejowej (w tym zakupu, montażu, spawania i wstępnego szlifowania szyn). Koszt inwestycyjny jest następnie równomiernie rozkładany na poszczególne lata eksploatacji. W przypadku utrzymania założono, że nie będzie wykonywane napawanie szyn. Koszt utrzymania składać się będzie z prewencyjnego szlifowania oraz wymiany fragmentów szyn po przekroczeniu dopuszczalnych zużyć. Koszt ten można opisać następującą zależnością:

$$K_{utr} = K_{szlif} + K_{wym} \quad (3.27)$$

gdzie:

K_{szlif} roczny koszt szlifowania w zł/m,
 K_{wym} roczny koszt wymiany szyn w zł/m.

Na koszt roczny składa się częstotliwość wykonywania wymian i szlifowania oraz koszt jednostkowy robót:

$$K_{szlif} = k_{sz} \cdot n_{sz} \quad (3.28)$$

gdzie:

k_{sz} koszt szlifowania szyn w zł/m,
 n_{sz} liczba szlifowań w ciągu roku.

$$K_{wym} = k_w \cdot n_w \quad (3.29)$$

gdzie:

k_w koszt wymiany szyn w zł/m,
 n_w liczba wymian szyn w ciągu roku.

Częstotliwość wykonywania prac zależna jest od przeniesionego obciążenia lub szybkości przyrostu zużyć w stosunku do wartości granicznych:

$$n_{sz} = \frac{Q}{Q_{sz}^{gr}} \quad (3.30)$$

$$n_w = \frac{z}{dz} \quad (3.31)$$

gdzie:

Q przeniesione obciążenie w ciągu roku w Tg/rok,
 Q_{sz}^{gr} obciążenie pomiędzy prewencyjnymi szlifowaniami w Tg,

- z zużycie szyny w ciągu roku w mm ,
 dz dopuszczalne zużycie szyny w mm .

Przy wykonywaniu analizy zużycia szyn oparto się na następujących modelach:

- zużycie 45° szyn w łuku według *INNOTRACK* [59];
- zużycie pionowe według funkcji obciążenia granicznego szyn na prostej według *Instrukcji Id-1* [127].

Model zużycia szyn oparty na wynikach projektu *INNOTRACK* zakłada funkcyjne powiązanie promienia łuku poziomego z wielkością zużycia 45° po przeniesieniu obciążenia 100 Tg. Dla szyny R260 podano zależność:

$$z_{45^\circ} = 63386R_M^{-1,5324} \quad (3.32)$$

Z uwagi na stosowanie w Polsce szyn R350HT, które nie były badane w ramach projektu *INNOTRACK*, przyjęto zależność podaną dla najbliższej twardości szyny R370CrHT:

$$z_{45^\circ} = 3703,5R_M^{-1,1551} \quad (3.33)$$

Założono dopuszczalną wartość zużycia bocznego 45° równą 24 mm; po przekroczeniu tej wartości szynę należy wymienić.

W przypadku obciążenia granicznego model zakłada określenie maksymalnego obciążenia, jakie może być przeniesione przez dany typ szyny, po którym szyna musi zostać wymieniona. Dla szyn R260 obciążenie graniczne wynosi 600 Tg, a dla szyn R350HT przyjęto wartość 900 Tg. Przyjmując średnie obciążenie roczne 30 Tg, szyny powinny być wymieniane nie rzadziej niż co 20 lat (dla szyn R260 [59]) i co 30 lat (dla szyn R350HT).

W przypadku szyn w łuku wymiana nie powinna być przeprowadzana rzadziej niż na odcinku prostym. Roczna częstotliwość wymian dla obu typów szyn opisano funkcjami:

$$n_{wa} = \max\left(\frac{Q}{Q_p^{gr}}; \frac{1}{t_e}; \frac{z_{45^\circ} \cdot Q}{dz_{45^\circ} \cdot 100Tg}\right) \quad (3.34)$$

gdzie:

- n_{wa} częstotliwość wymian szyn na łuku w $1/rok$,
 Q_p^{gr} graniczne obciążenie szyn między wymianami w Tg,
 t_e maksymalny czas eksploatacji szyny w rok,
 z_{45° wartość zużycia bocznego 45° po przeniesieniu obciążenia 100 Tg w mm ,
 dz_{45° dopuszczalne zużycie boczne 45° szyny w mm .

Koszty jednostkowe robót zostały przyjęte na podstawie Katalogu cen robót kolejowych i tramwajowych [8]. Przeprowadzono również analizę miejsca zmiany kierunku trasy kolejowej o zadanym kącie zwrotu. Wykonano obliczenia dla typowego, symetrycznego układu geometrycznego. Obliczenia powtórzono dla promieni łuku od 200 do 4000 metrów. Obliczenia przeprowadzono dla dwóch stosowanych w Polsce typów stali szynowej: R350HT i R260. Na łuku zastosowano stal R350HT oraz R260 na prostej, dla drugiego przypadku szyny R260 na całej długości odcinka. Zasięg odcinków prostych określono na taki, że przy największym analizowanym promieniu łuku długość prostych wynosiła 0. Zgodnie z interpretacją wewnętrznych przepisów PKP PLK, na zewnętrznym toku krzywej przejściowej należy

zmienić rodzaj szyny w miejscu, w którym krzywizna przekracza wartość $1/800$ rad/m. Z uwagi na warunki początkowe porównania stwierdzono, że analityczne obliczenia układu z krzywymi przejściowymi nie spowodują znaczącej zmiany w uzyskanym wyniku, wpłyną jednak na ilość rozpatrywanych wariantów. W ostatnim etapie obliczono roczny koszt życia inwestycji przeliczony na 1 metr toru.

Wykonanie	R260	R350HT
Ułożenie 1m toru	1178,63 j	1286,63 j
Wymiana 1m szyny	186 j	240 j
Szlifowanie 1m szyny	36 j	36 j

Tab. 3.1. Przyjęte w obliczeniach koszty jednostkowe

Obliczenia wykonano dla silnie obciążonej linii kolejowej (30 Tg/rok), przy założeniu kosztów jednostkowych przedstawionych w tabeli 3.1. Fragment obliczeń pomocniczych pokazano w tabeli 3.2.

R[m]	R350HT	R260	R350HT	R260	Utrzymanie	LCC
	Wymian/rok		Szlifowań /rok			
200	0,10	0,05	0,67	2	79,79	1765,36
250	0,08	0,05	0,67	2	79,09	1761,17
300	0,06	0,05	0,67	2	78,40	1757,02
350	0,05	0,05	0,67	2	77,71	1752,88
400	0,05	0,05	0,67	2	77,02	1748,77
450	0,04	0,05	0,67	2	76,34	1744,66
500	0,04	0,05	0,67	2	75,65	1740,55

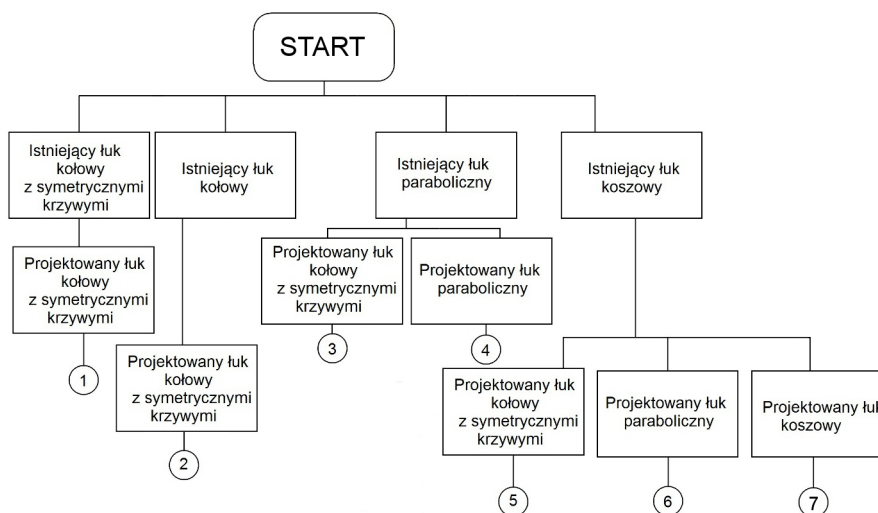
Tab. 3.2. Obliczenia kosztu cyklu życia inwestycji

Wartość kosztu cyklu życia zależy od zakresu przebudowy oraz zastosowanych materiałów. W trakcie analizy dla każdego generowanego układu geometrycznego zostaje wyznaczony koszt cyklu życia szyn kolejowych według schematu uwzględniającego koszty inwestycji utrzymania i wymiany szyn.

Rozdział 4

Algorytmy przesunięć osi toru

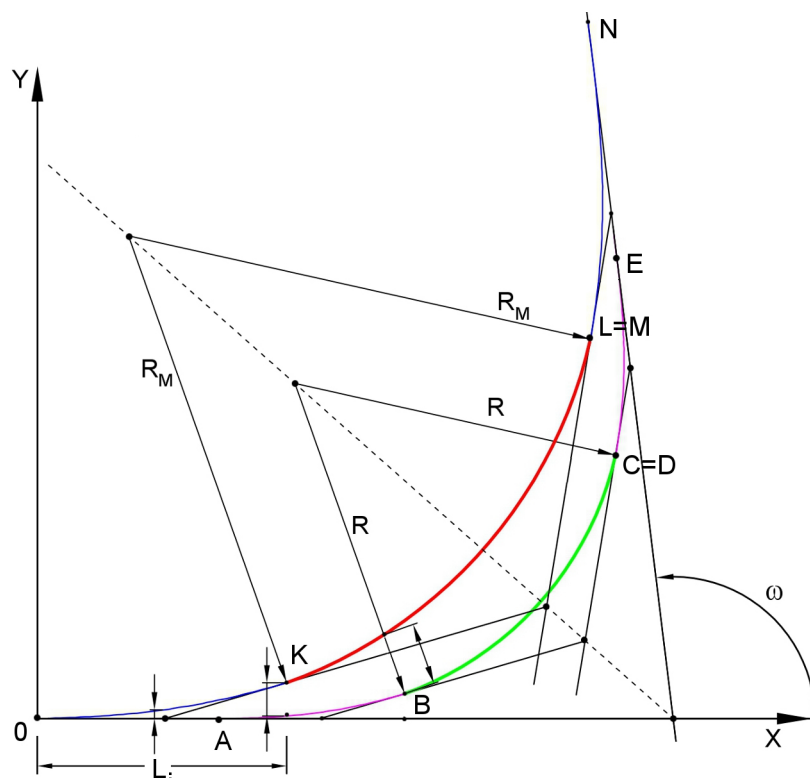
W rozdziale omówione zostały algorytmy obliczania przesunięć osi toru istniejącego względem projektowanego, których idea wzorowana jest na pracach M. Bałuch [20, 26]. Obliczanie przesunięć wykonano dla różnych typów łuków, których podział został przedstawiony na rysunku 4.1. W algorytmach zastosowano pewne uproszczenia, które mają usprawnić kalkulację. Przybliżenia te mają jednak znikome znaczenie w procesie tworzenia wariantów projektowych na potrzeby studium wykonalności. Należy również zaznaczyć, że kształt istniejącego układu geometrycznego po wieloletniej eksploatacji będzie się różnił od jego pierwotnie zaprojektowanej formy. Założono więc, że w opisywanej metodzie mogą zostać przyjęte uproszczenia odnośnie układu projektowanego. Konstrukcja algorytmu nie wyklucza jednak późniejszego rozbudowania i zastosowania metod ścisłych [65] do projektowania kształtu układu geometrycznego.



Rys. 4.1. Podział łuków

Opracowując algorytmy obliczeniowe przyjęto następujące założenia [20, 26]:

- Środek lokalnego układu współrzędnych (x,y) znajduje się w punkcie początkowym nowego układu (rys. 4.2);
- Wartość kąta zwrotu trasy ω jest stała (rys. 4.2);
- Przesunięcia w strefie, w której występuje tylko projektowana krzywa przejściowa i prosta (układ istniejący), są liczone jako rzędna y – rzut prostopadły punktu krzywej przejściowej na prostą istniejącą (oś x);
- Długość krzywej przejściowej L_i jest równa wartości odciętej x punktu znajdującego się na końcu długości tej krzywej;



Rys. 4.2. Schemat łuku kołowego z symetrycznymi krzywymi przejściowymi: istniejącego (kolor fioletowy i zielony) i projektowanego (kolor granatowy i czerwony)

- Przesunięcia w strefie, w której występuje tylko projektowany łuk kołowy i prosta, są liczone jako rzędna y – rzut prostopadły punktu na łuku na prostą istniejącą (oś x);
- Przesunięcia w strefie, w której znajduje się projektowany łuk kołowy i istniejąca krzywa przejściowa są wyznaczone jako różnica rzędnych punktu znajdującego się na łuku kołowym i punktu na krzywej (punkt leżący poniżej punktu na prostej – prostopadle do osi x);
- Przesunięcia w strefie, w której znajdują się krzywe przejściowe projektowana i istniejąca, są obliczane jako różnica rzędnych punktu znajdującego się na krzywej projektowanej i punktu na krzywej istniejącej (punkt leżący poniżej punktu na prostej – prostopadle do osi x);
- Przesunięcia w strefie, w której znajdują się łuki kołowe projektowany i istniejący, są wykonywane wzdłuż promienia łuku istniejącego.

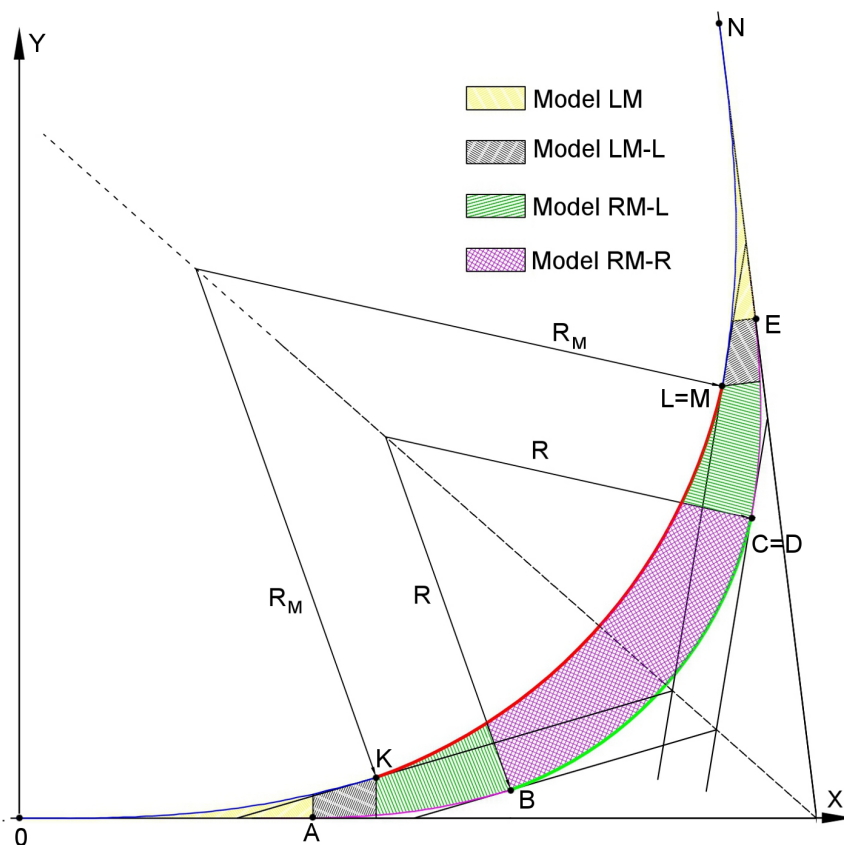
W celu ujednoczenia opisu punktów głównych omawianych układów geometrycznych zastosowano następujące oznaczenia:

- istniejące łuki są opisywane literami $A - E$, które oznaczają:
 - A – początek krzywej przejściowej,
 - B – koniec krzywej przejściowej, początek łuku kołowego,
 - C – koniec pierwszego łuku kołowego, początek drugiego łuku kołowego (dotyczy łuków koszowych),
 - D – koniec drugiego łuku kołowego, koniec drugiej krzywej przejściowej,
 - E – początek drugiej krzywej przejściowej;

- łuki projektowane natomiast:
 - 0 – początek krzywej przejściowej,
 - K – koniec krzywej przejściowej, początek łuku kołowego,
 - L – koniec pierwszego łuku kołowego, początek drugiego łuku kołowego (dotyczy łuków koszowych),
 - M – koniec drugiego łuku kołowego, koniec drugiej krzywej przejściowej,
 - N – początek drugiej krzywej przejściowej.

4.1. Charakterystyka zastosowanych modeli

W celu uproszczenia obliczeń uznano, że każdy układ istniejący i projektowany zostanie podzielony na odpowiednie strefy. W zależności od długości odciętej, przesunięcia będą liczone według sześciu różnych algorytmów obliczeniowych (tzw. modeli). Sposób podziału na strefy i modele został zaczerpnięty z prac M. Bałuch [20, 26]. Przykładowy podział na strefy i przyporządkowane modele pokazuje rysunek 4.3



Rys. 4.3. Schemat łuku kołowego z symetrycznymi krzywymi przejściowymi z podziałem na strefy i modele

4.1.1. Model LM

Model LM nazwę bierze od długości L_M projektowanej krzywej przejściowej i obejmuje obliczenia przesunięć od punktu początkowego projektowanej krzywej

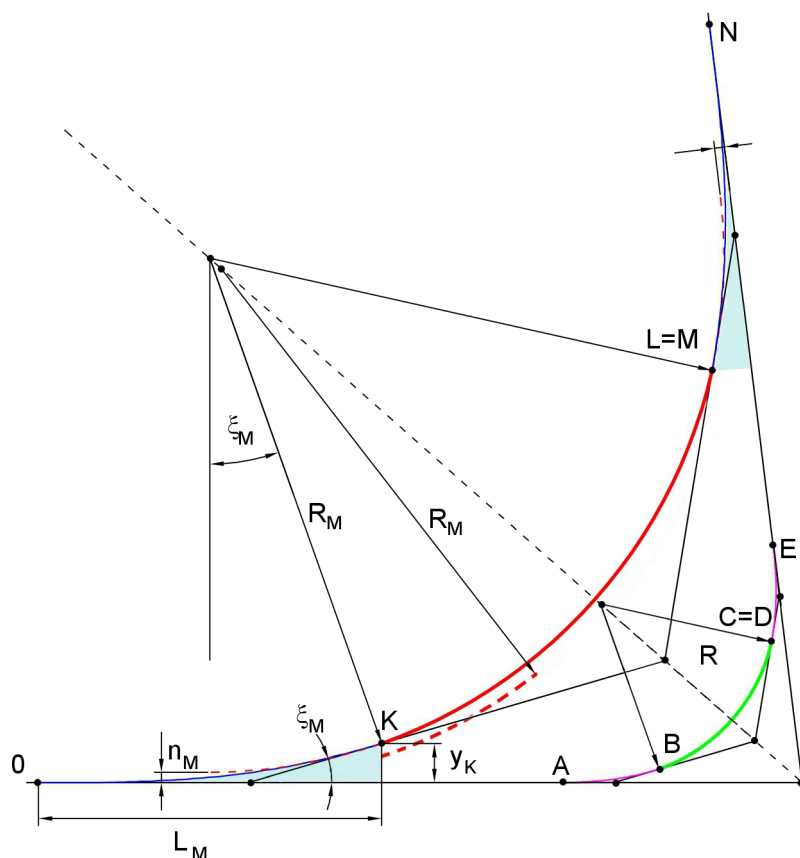
przejęciowej do jej końca (rys. 4.4). Jeżeli początek krzywej istniejącej znajduje się przed końcem nowej krzywej, obliczenia w tej strefie kończą się w punkcie początkowym istniejącej krzywej przejęciowej. Dla odpowiedniej wartości odciętej (wartość dana) wyznaczone zostają rzędne. W tym przypadku rzędne będą równe przesunięciu układu. Przyjęto, że krzywa przejęciowa jest opisana równaniem paraboli trzeciego stopnia, a rzędne wyznaczone są za pomocą zależności:

$$y_{LM} = w_{LM} = \frac{x^3}{6R_M L_M} \quad (4.1)$$

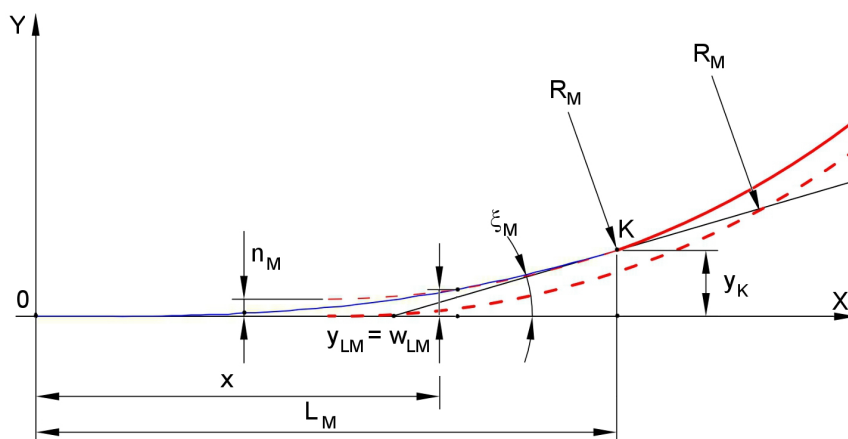
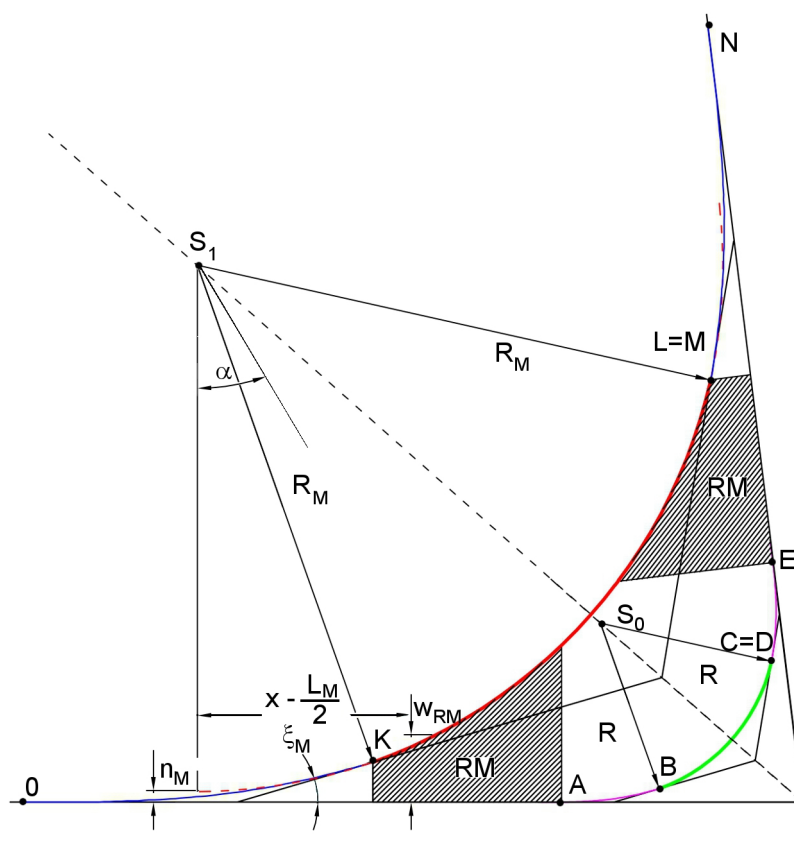
gdzie:

x wartość odciętej w m .

Projektowany łuk kołowy z symetrycznymi krzywymi przejęciowymi w postaci paraboli trzeciego stopnia obrazuje rysunek 4.5



Rys. 4.4. Schemat istniejącego i projektowanego łuku kołowego z krzywymi przejęciowymi (wyznaczanie przesunięć dla modelu LM – zaciemniony obszar)

Rys. 4.5. Schemat projektowanej krzywej przejściowej – model **LM**Rys. 4.6. Schemat istniejącego i projektowanego łuku kołowego z krzywymi przejściowymi (wyznaczanie przesunięć dla modelu **RM** – zakreskowany obszar)

4.1.2. Model RM

Model **RM**, o nazwie od promienia R_M projektowanego łuku kołowego, służy do obliczeń przesunięć nowego łuku względem odcinka prostego toru. W modelu tym należy wyznaczyć kąt α dla nowej krzywej przejściowej (rysunek 4.6):

$$\alpha = \arcsin \frac{x - \frac{L_M}{2}}{R_M} \quad (4.2)$$

Projektowany łuk jest przesunięty na kierunku y o wartość n_M , która wynosi:

$$n_M = y_{k_M} - R_M (1 - \cos \xi_M) \approx \frac{L_M^2}{24R_M} \quad (4.3)$$

gdzie:

y_{k_M} rzędna końca projektowanej krzywej przejściowej $y_{k_M} = \frac{L_M^2}{6R_M}$ w m ,
 ξ_M kąt nachylenia stycznej do krzywej $\xi_M = \arctg \frac{L_M}{2R_M}$ w $^\circ$.

Rzędna łuku jest równa wartości przesunięcia i można wyznaczyć ją z zależności:

$$w_{RM} = R_M (1 - \cos \alpha) + n_M \quad (4.4)$$

4.1.3. Model RM-L

Do obliczeń przesunięć nowego łuku o promieniu R_M względem istniejącej krzywej przejściowej o długości L_i służy model **RM-L**. W modelu tym wykorzystywana jest również wartość kąta α opisanego wzorem (4.2). Do wyznaczenia wartości przesunięcia należy wcześniej policzyć odciętą x_A . Jest to odległość od początku układu współrzędnych do początku istniejącej krzywej przejściowej (dla przypadku istniejącego łuku kołowego z symetrycznymi krzywymi przejściowymi). Przesunięcia obliczane są za pomocą zależności:

$$w_{RM-L} = R_M (1 - \cos \alpha) + n_M - \frac{(x - x_A)^3}{6RL_i} \quad (4.5)$$

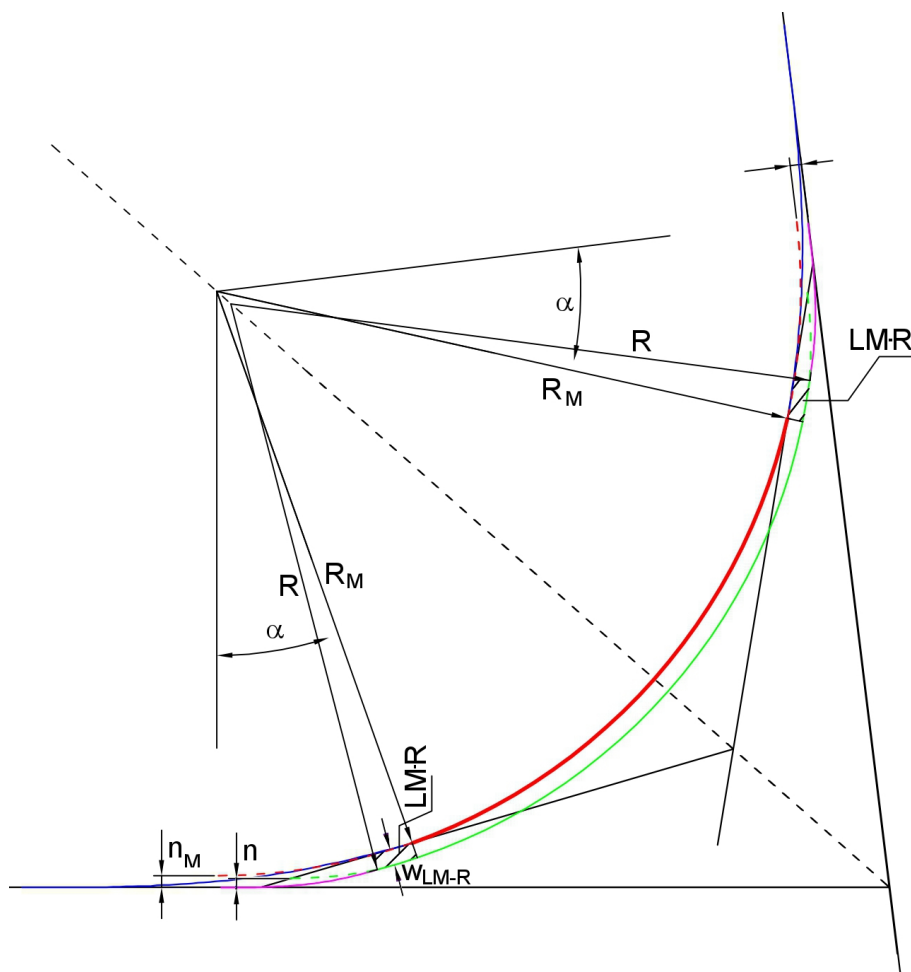
gdzie:

L_i długość istniejącej krzywej przejściowej w m .

4.1.4. Model LM-L

W modelu **LM-L** obliczane są przesunięcia projektowanej krzywej przejściowej o długości L_M względem krzywej istniejącej o długości L_i . Przesunięcia w tym modelu są różnicą rzędnych krzywej istniejącej i projektowanej. Wyznaczenie tych wartości opisuje zależność:

$$w_{LM-L} = \frac{x^3}{6R_M L_M} - \frac{(x - x_A)^3}{6RL_i} \quad (4.6)$$



Rys. 4.7. Schemat istniejącego i projektowanego łuku kołowego z krzywymi przejściowymi (wyznaczanie przesunięć dla modelu **LM-R** – zakresowany obszar)

4.1.5. Model LM-R

Model **LM-R** dotyczy obliczeń przesunięć osi toru projektowanej krzywej przejściowej o długości L_M względem istniejącego łuku kołowego o promieniu R (rysunek 4.7). Do wyznaczenia przesunięć należy najpierw obliczyć wartość kąta α :

$$\alpha = \arcsin \frac{x - x_A - \frac{L_i}{2}}{R} \quad (4.7)$$

Łuk istniejący jest przesunięty na kierunku y o wartość n , która wynosi:

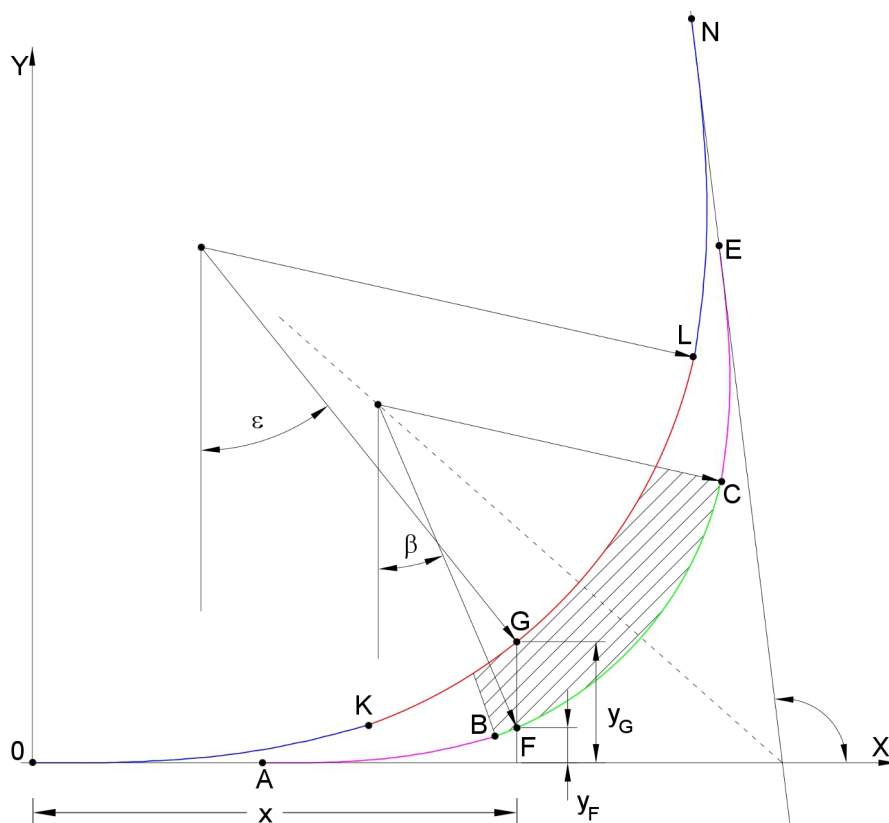
$$n = y_k - R(1 - \cos \xi) \approx \frac{L_i^2}{24R} \quad (4.8)$$

gdzie:

- n przesunięcie łuku istniejącego do wewnątrz w m ,
- y_k rzędna końca krzywej przejściowej $y_k = \frac{L_i^2}{6R}$ w m ,
- ξ kąt nachylenia stycznej do krzywej $\xi = \arctg \frac{L_i}{2R}$ w $^\circ$.

Mając dane wartości α i n można obliczyć przesunięcia:

$$w_{LM-R} = \frac{x^3}{6R_M L_M} - n - R(1 - \cos \alpha) \quad (4.9)$$



Rys. 4.8. Schemat istniejącego i projektowanego łuku kołowego z krzywymi przejściowymi (wyznaczanie przesunięć dla modelu **RM-R** – zakreskowany obszar)

4.1.6. Model RM-R

Ostatni model, oznaczony symbolem **RM-R**, obejmuje obliczenia przesunięć nowego łuku R_M względem łuku istniejącego o promieniu R . Obliczenia przesunięć w tej strefie są wyznaczone wzdłuż istniejącego promienia łuku. Dla przypadku łuków kołowych z symetrycznymi krzywymi przejściowymi obliczenia te wystarczy przeprowadzić dla połowy układu (zachowana symetria). W pierwszym etapie obliczeń należy wyznaczyć kąt β (rys. 4.8):

$$\beta = \arcsin \left\{ \frac{x - [(R_M - R) \operatorname{tg}(\frac{\omega}{2})] - \frac{L_M}{2}}{R} \right\} \quad (4.10)$$

Rzędna punktu F znajdującego się na łuku istniejącym określona jest zależnością:

$$y_F = n + R(1 - \cos \beta) \quad (4.11)$$

Punkt G , znajdujący się powyżej punktu F na projektowanym łuku kołowym, można wyznaczyć korzystając z następującego wyrażenia:

$$y_G = n_M + R_M(1 - \cos \varepsilon) \quad (4.12)$$

gdzie:

ε kąt zawarty pomiędzy połową projektowanej krzywej przejściowej i punktem G , opisany zależnością: $\varepsilon = \left(\frac{x - \frac{L_M}{2}}{R_M} \right)$

W modelu **RM-R** przesunięcia można wyznaczyć z równania:

$$w_{RM-R} = (y_G - y_F) \cos \beta \quad (4.13)$$

4.2. Łuk kołowy z krzywymi przejściowymi

W przypadku modernizacji symetrycznego układu, złożonego z łuku kołowego i dwóch krzywych przejściowych, obliczenia przesunięć toru wykonywane są w trzech wariantach [20, 26](rys. 4.9). Wybór wariantu zależy od następujących parametrów:

- długości istniejących i projektowanych krzywych przejściowych,
- wartości istniejących i projektowanych promieni łuków kołowych,
- kąta zwrotu trasy.

Rozwiązanie tego przypadku zostało szczegółowo opisane w pracy [20]. W pierwszej kolejności rozwiązywany układ jest dzielony na strefy. W każdej strefie obliczane są wartości przesunięć na końcach przedziałów, z wykorzystaniem odpowiedniego modelu. Obliczane są również wartości przesunięć w określonej lokalizacji wewnątrz przedziału; w zależności od przypadku geometrycznego może być to jeden z sześciu modeli opisanych w podrozdziale 4.1. Lokalizacja czyli odcięta x może być wybrana w sposób dowolny [111] lub wyrażona jako krok obliczeniowy.

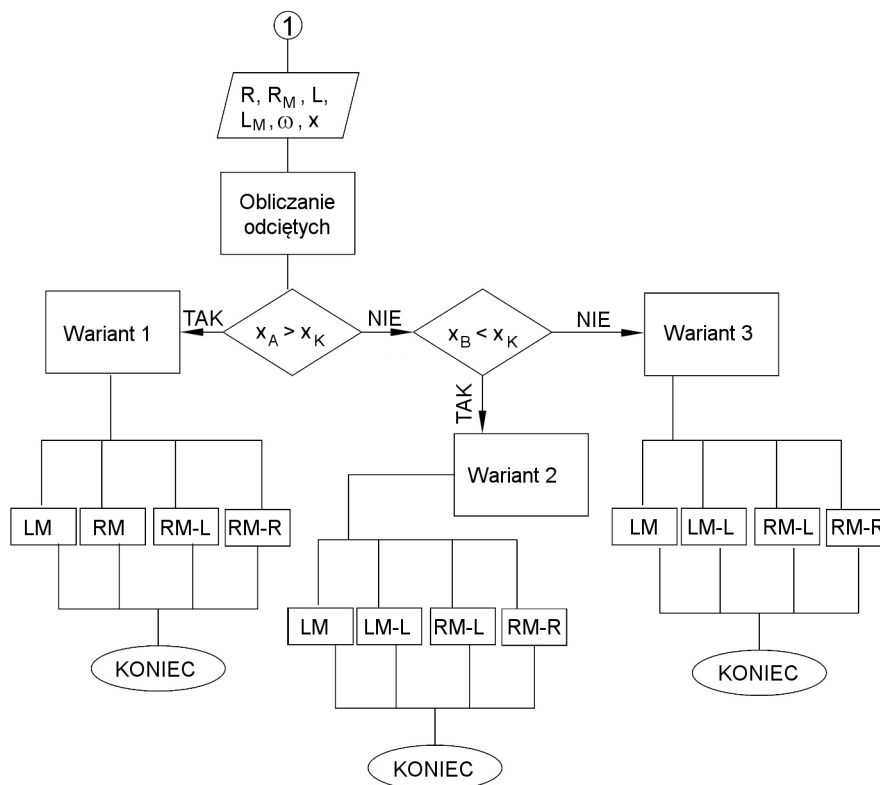
Wariant 1 wystąpi, gdy odcięta punktu K (koniec projektowanej krzywej przejściowej) jest mniejsza od odciętej A (początek istniejącej krzywej przejściowej – rys. 4.10). W wariantcie tym wykorzystywane są następujące modele: **LM**, **RM**, **RM-L**, **RM-R**.

Wariant 2 obejmuje przypadki, w których odcięta punktu K jest większa od odciętej punktu B (koniec istniejącej krzywej przejściowej – rys. 4.11). Do obliczeń wykorzystuje się wówczas modele: **LM**, **LM-L**, **RM-L**, **RM-R**.

Wariant 3 charakteryzuje się tym, że odcięta punktu A znajduje się w strefie krzywej projektowanej, a odcięta punktu B jest większa od odciętej punktu K (4.12). Modele obliczeniowe dla tego wariantu to: **LM**, **LM-L**, **LM-R**, **RM-R**.

W celu obliczenia przesunięć projektowanego układu geometrycznego względem układu istniejącego wykorzystano 6 modeli:

- Model **LM** – obliczenia według tego modelu prowadzone są w wariantcie 1 na odcinku OK , a w wariantach 2 i 3 na odcinku OA ;
- Model **RM** – obliczenia te są wykonywane tylko dla wariantu 1 na odcinku KA ;
- Model **RM-L** – obliczenia te prowadzi się w wariantcie 1 na odcinku AB oraz w wariantcie 2 na odcinku KB ;



Rys. 4.9. Schemat algorytmu wyznaczającego przesunięcia osi toru (projektowanego względem istniejącego) z podziałem na warianty obliczeniowe – przypadek istniejącego i projektowanego łuku kołowego z krzywymi przejściowymi

- model **LM-L** – model ten dotyczy wariantu 2 na odcinku AB i wariantu 3 na odcinku AK ;
- Model **LM-R** – wykorzystuje się w wariantcie 3 na długości odcinka BK ;
- Model **RM-R** – przesunięcia te są liczone we wszystkich trzech wariantach w strefie mieszczącej się za końcami obu krzywych przejściowych.

W pierwszej kolejności należy wyznaczyć strefy, w których będą miały zastosowanie odpowiednie modele. W tym celu obliczana jest wartość p , którą można wyznaczyć korzystając z równania (4.14). Jest to odległość pomiędzy teoretycznym początkiem łuku projektowanego i łuku istniejącego (rysunek 4.13).

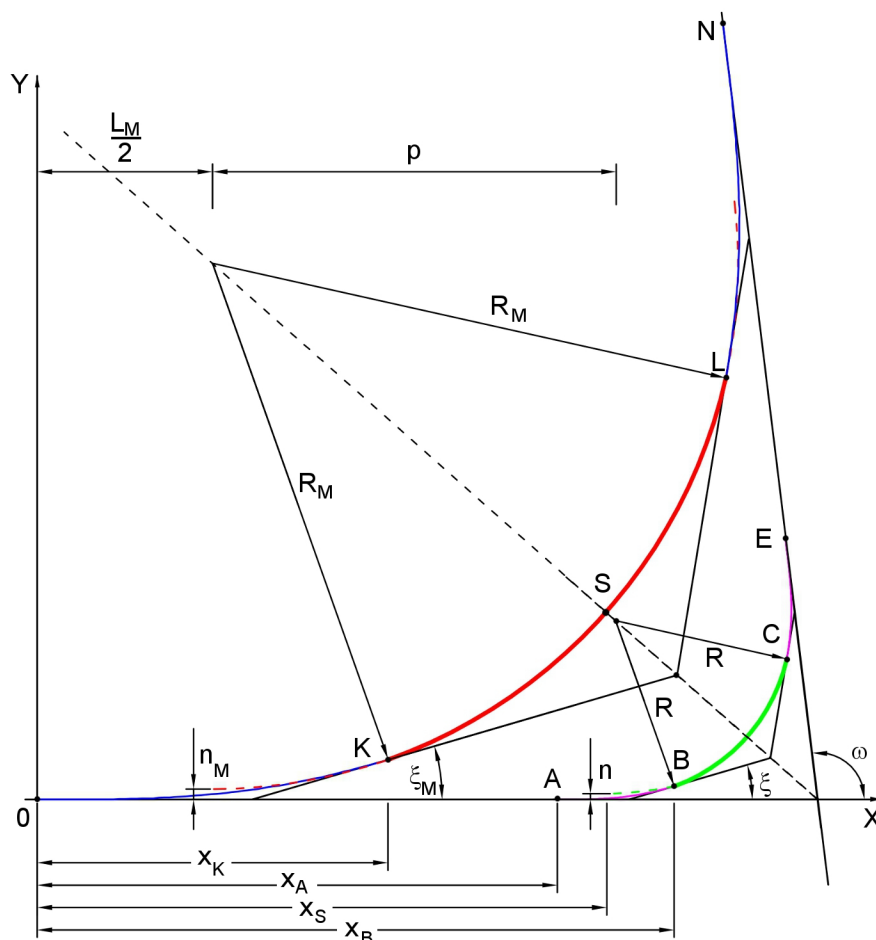
$$p = (R_M - R) \operatorname{tg} \left(\frac{\omega}{2} \right) \quad (4.14)$$

Odciętą punktu A , który znajduje się na początku pierwszej krzywej przejściowej łuku istniejącego wyznacza się za pomocą wyrażenia:

$$x_A = \frac{L_M}{2} + p - \frac{L_i}{2} \quad (4.15)$$

Wartość odciętej punktu B , wyznaczającego koniec pierwszej krzywej przejściowej łuku istniejącego, obliczana jest z zależności:

$$x_B = x_A + \frac{L_i}{2} + R_M \sin \xi_M \approx x_A + L_i \quad (4.16)$$



Rys. 4.10. Schemat łuku kołowego z symetrycznymi krzywymi przejściowymi: istniejącego (kolor fioletowy i zielony) i projektowanego (kolor granatowy i czerwony) – obliczenia przesunięć osi toru według wariantu 1

Odcięta w punkcie K , na końcu pierwszej projektowanej krzywej przejściowej, wynosi:

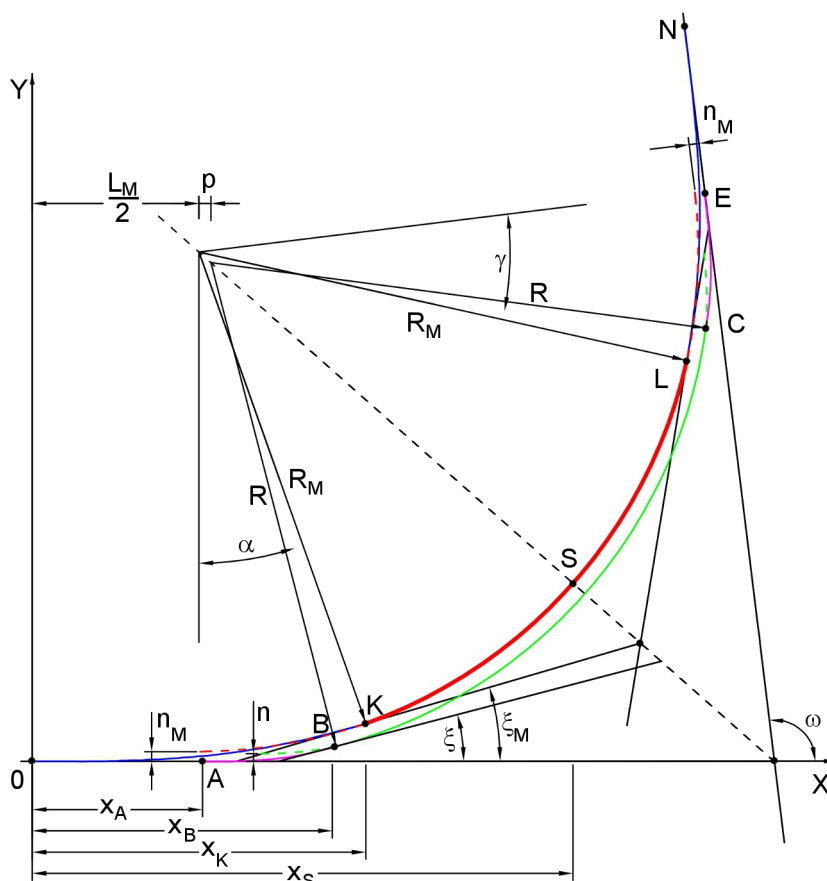
$$x_K = \frac{L_M}{2} + R_M \sin \xi_M \approx L_M \quad (4.17)$$

Ponieważ przyjęto, że układy są symetryczne, dlatego rozpatrywane są do połowy długości projektowanego łuku kołowego. Dla tego przypadku nie są obliczane wartości odciętych znajdujących się poza tym przedziałem. Przesunięcia układu są więc obliczane do punktu S , który wyznacza środek łuku o promieniu R_M . Odcięta punktu S wyznaczana jest za pomocą następującego wyrażenia:

$$x_S = \frac{L_M}{2} + \frac{\pi R_M \omega}{360} \quad (4.18)$$

4.3. Łuk kołowy bez krzywych przejściowych

Rozważany istniejący układ geometryczny łączy dwa proste odcinki toru o innych kierunkach za pomocą łuku kołowego. Założono, że dla takiego przypadku



Rys. 4.11. Schemat łuku kołowego z symetrycznymi krzywymi przejściowymi: istniejącego (kolor fioletowy i zielony) i projektowanego (kolor granatowy i czerwony) – obliczenia przesunięć osi toru według wariantu 2

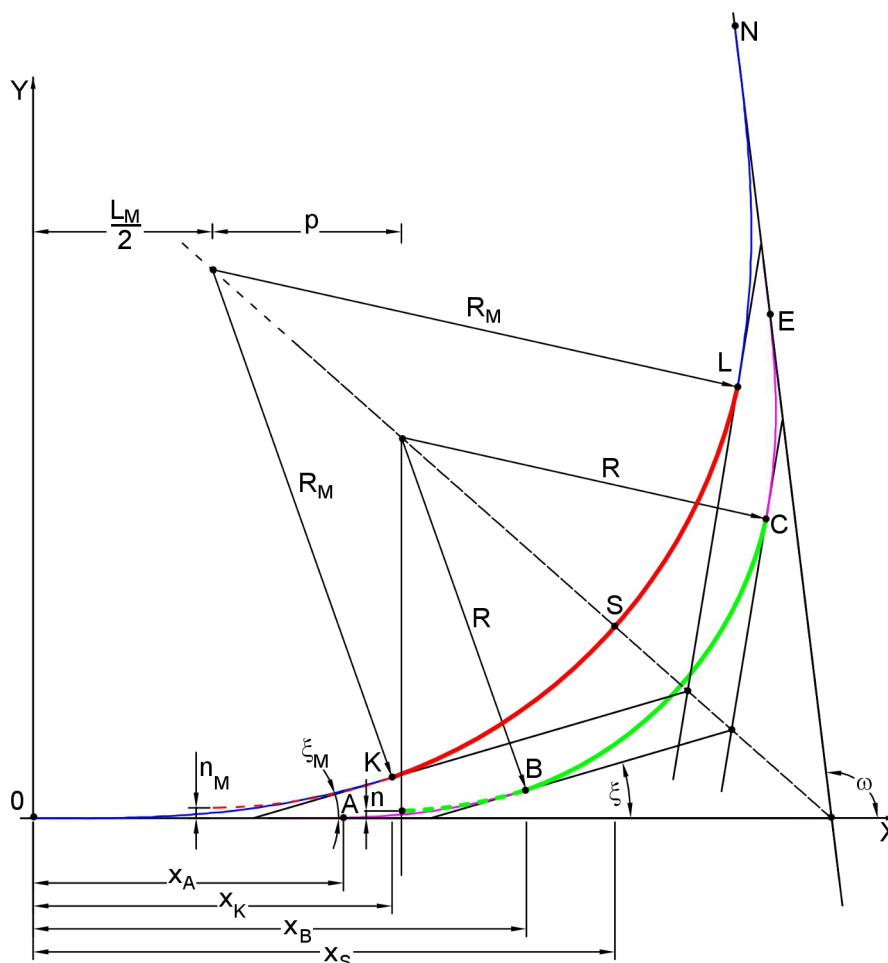
uzyskanie wyższych parametrów techniczno – eksploatacyjnych można uzyskać na przykład poprzez zaprojektowanie łuku z krzywymi przejściowymi (rys. 4.14). Podobnie jak w poprzednich przypadkach, postanowiono o podzieleniu rozpatrywanego układu istniejącego na warianty obliczeniowe. Wystąpienie danego wariantu uzależnione jest od parametrów geometrycznych układu istniejącego i projektowanego. W analizowanym przypadku mogą wystąpić dwa warianty obliczeniowe.

Wariant 1 obejmuje przypadki, w których wartość odciętej punktu K (koniec projektowanej krzywej przejściowej) jest mniejsza od odciętej punktu B (początek łuku kołowego). Obliczenia wykonywane są według modeli: **LM**, **RM**, **RM-R** (rys. 4.15).

Wariant 2 ma zastosowanie, gdy wartość odciętej punktu K jest większa od wartości odciętej B (rys. 4.16). Obliczenia wykonywane są według modeli: **LM**, **LM-R**, **RM-R**.

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

Do obliczenia przesunięć osi toru projektowanego układu względem układu istniejącego wykorzystuje się cztery modele:

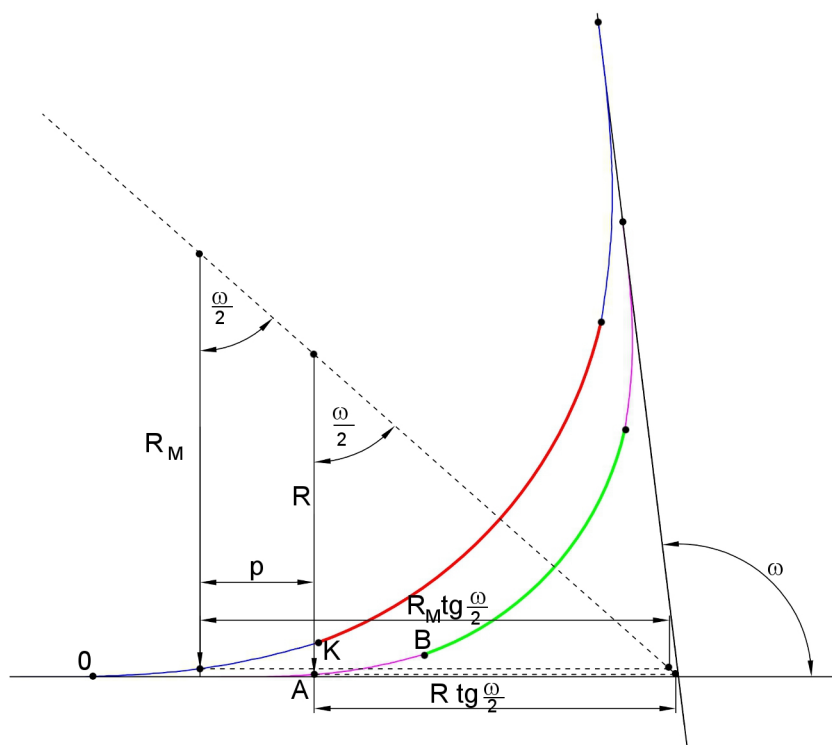


Rys. 4.12. Schemat łuku kołowego z symetrycznymi krzywymi przejściowymi: istniejącego (kolor fioletowy i zielony) i projektowanego (kolor granatowy i czerwony) – obliczenia przesunięć osi toru według wariantu 3

- Model **LM** – przesunięcia projektowanej krzywej przejściowej względem osi odciętych (odcinka prostego toru) w wariantie 1 obliczane są na odcinku OK natomiast w wariantie 2 na odcinku OB ;
- Model **LM-R** - przesunięcia projektowanej krzywej przejściowej o długości L_M względem istniejącego łuku kołowego o promieniu R , obliczenia przesunięć według tego modelu dotyczą wyłącznie wariantu 2 na odcinku BK ;
- Model **RM** – przesunięcia projektowanego łuku o promieniu R_M względem osi odciętych liczone są w wariantie 1 od punktu K do punktu B ;
- Model **RM-R** – przesunięcia projektowanego łuku względem łuku istniejącego liczone są dla obu wariantów; dla wariantu 1 na odcinku BS , zaś dla wariantu 2 na odcinku KS .

Zmienia się natomiast strefy obliczeń odnoszących się do poszczególnych modeli. W takiej sytuacji należy wyznaczyć odcięte punkty, które będą wykorzystywane dla tego przypadku. Wartość odciętej punktu B można obliczyć z równania:

$$x_B = T_{0M} - T_{0_{ik}} \quad (4.19)$$



Rys. 4.13. Schemat łuku kołowego z symetrycznymi krzywymi przejściowymi: istniejącego (kolor fioletowy i zielony) i projektowanego (kolor granatowy i czerwony) – wyznaczenie wielkości p

gdzie:

T_{0M} styczna główna łuku projektowanego w m ;

T_{0ik} styczna istniejącego łuku kołowego w m .

Długość stycznej głównej projektowanego układu T_{0M} określa zależność:

$$T_{0M} = x_{sM} + (R_M + n_M) \operatorname{tg} \frac{\omega}{2} \quad (4.20)$$

gdzie:

n_M przesunięcie łuku do wewnątrz, wyznaczone za pomocą zależności (4.3) w m ,

ω kąt zwrotu trasy w $^\circ$,

x_{sM} odcięta środka okręgu dla projektowanego łuku kołowego w m .

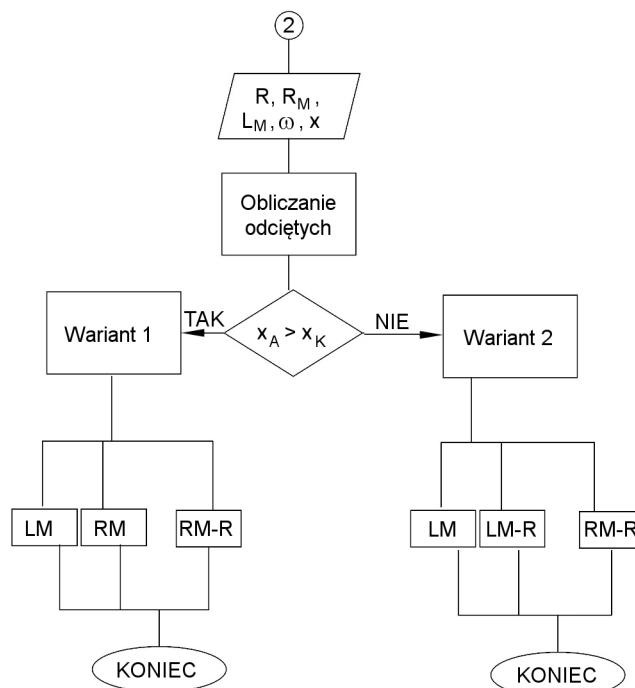
Długość stycznej istniejącego łuku kołowego można wyznaczyć korzystając z zależności:

$$T_{0ik} = R \operatorname{tg} \frac{\omega}{2} \quad (4.21)$$

Długość odciętej x_K końca krzywej przejściowej wyznaczana jest z zależności (4.17), natomiast długość odciętej x_S z wyrażenia (4.18).

Dodatkowo można wyznaczyć wartości innych odciętych punktów charakterystycznych na obu łukach. Odcięta końca łuku kołowego x_C opisuje zależność:

$$x_C = T_{0ik} (1 + \cos \omega) + x_B \quad (4.22)$$



Rys. 4.14. Schemat algorytmu wyznaczającego przesunięcia osi toru (projektowanego względem istniejącego) z podziałem na warianty obliczeniowe – przypadek istniejącego łuku kołowego bez krzywych przejściowych i projektowanego łuku kołowego z krzywymi przejściowymi

Odcięta x_L końca drugiej projektowanej krzywej przejściowej wynosi:

$$x_L = x_N - \frac{2L_M \cos \omega}{3} - \frac{L_M}{3 \cos \xi_M} \cos(\omega - \xi_M) \quad (4.23)$$

Wartość odciętej x_N końca projektowanego łuku opisuje zależność:

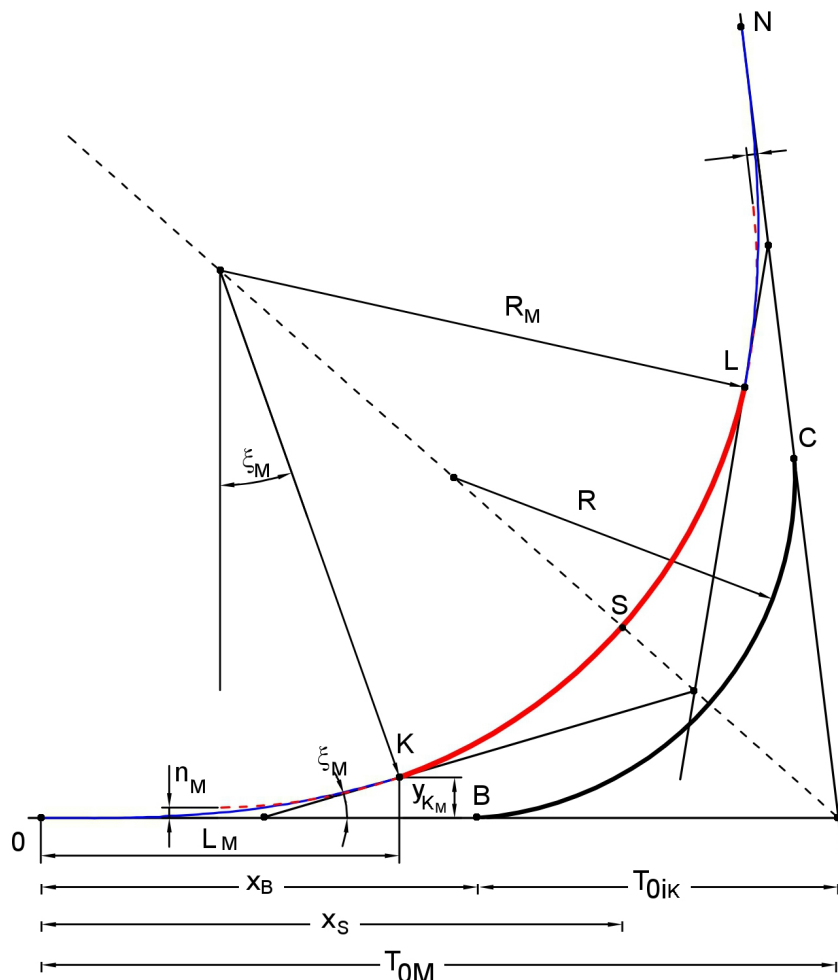
$$x_N = T_{0M} (1 + \cos \omega) \quad (4.24)$$

4.4. Łuk paraboliczny

Istniejący łuk paraboliczny w wyniku modernizacji może zostać zastąpiony symetrycznym łukiem kołowym z krzywymi przejściowymi lub istniejące krzywe przejściowe mogą być wydłużone (rys. 4.17). W przypadku łuku kołowego z krzywymi przejściowymi mogą wystąpić dwa warianty obliczeń [113].

Wariant 1 wystąpi, gdy wartość odciętej punktu K (koniec projektowanej krzywej przejściowej) jest mniejsza od odciętej A (początek istniejącej krzywej przejściowej). Obliczenia wykonywane są według modeli: **LM**, **RM**, **RM-L** (rys. 4.18).

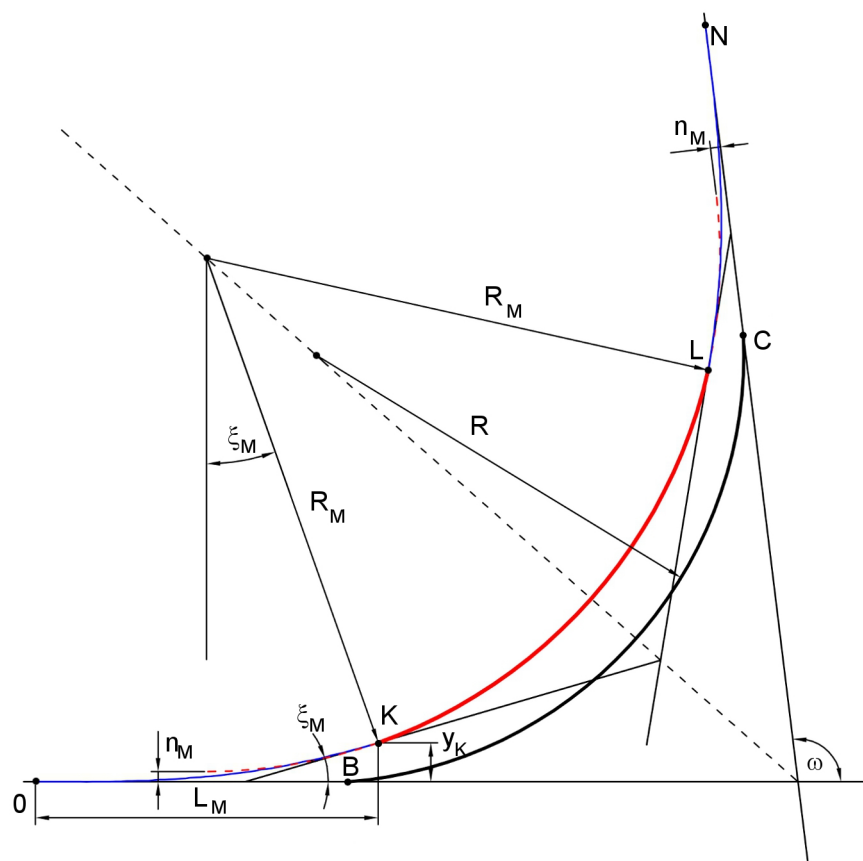
Wariant 2 obejmuje przypadki, gdy odcięta punktu K jest większa od odciętej punktu A (rys. 4.19). Wyznaczenie przesunięć osi toru projektowanego od istniejącego wykonywane jest według modeli: **LM**, **LM-L**, **RM-L**.



Rys. 4.15. Schemat istniejącego łuku kołowego bez krzywych przejściowych (kolor czarny) i projektowanego łuku kołowego z krzywymi przejściowymi (kolor granatowy i czerwony) – obliczenia przesunięć osi toru według wariantu 1

Opisywany algorytm dotyczy istniejącego łuku parabolicznego złożonego z dwóch krzywych przejściowych o promieniu R i długości L_i . Modernizację takiego układu (w celu zwiększenia prędkości) można dokonać projektując w tym miejscu nowy łuk kołowy o promieniu R_M z symetrycznymi krzywymi przejściowymi długości L_M . Do obliczenia przesunięć osi toru wykorzystywane są cztery modele:

- Model **LM** – przesunięcia projektowanej krzywej przejściowej względem osi odciętych (odcinka prostego toru) obliczane są od początku układu współrzędnych do punktu K dla wariantu 1, zaś do punktu A dla wariantu 2;
- Model **LM-L** - przesunięcia projektowanej krzywej przejściowej L_M względem istniejącej krzywej L_i obliczane są tylko w wariantie 2 w przedziale mieszczącym się pomiędzy odciętymi punktów A i K ;
- Model **RM** - przesunięcia projektowanego łuku o promieniu R_M względem osi odciętych liczone są wyłącznie dla wariantu 1 na odcinku KA ;
- Model **RM-L** – przesunięcia projektowanego łuku o promieniu R_M względem istniejącej krzywej przejściowej o długości L_i liczone są dla obu wariantów; dla wariantu 1 od punktu A do S , a dla wariantu 2 na odcinku KS .



Rys. 4.16. Schemat istniejącego łuku kołowego bez krzywych przejściowych (kolor czarny) i projektowanego łuku kołowego z krzywymi przejściowymi (kolor granatowy i czerwony) – obliczenia przesunięć osi toru według wariantu 2

Wartość odciętej w punkcie A, tj. początku istniejącego łuku parabolicznego, wynosi:

$$x_A = T_{0M} - T_{0ip} \quad (4.25)$$

gdzie:

T_{0M} styczna główna łuku projektowanego w m ,
 T_{0ip} styczna główna istniejącego łuku parabolicznego w m .

Wartość odciętej x_{sM} projektowanego łuku kołowego opisuje zależność:

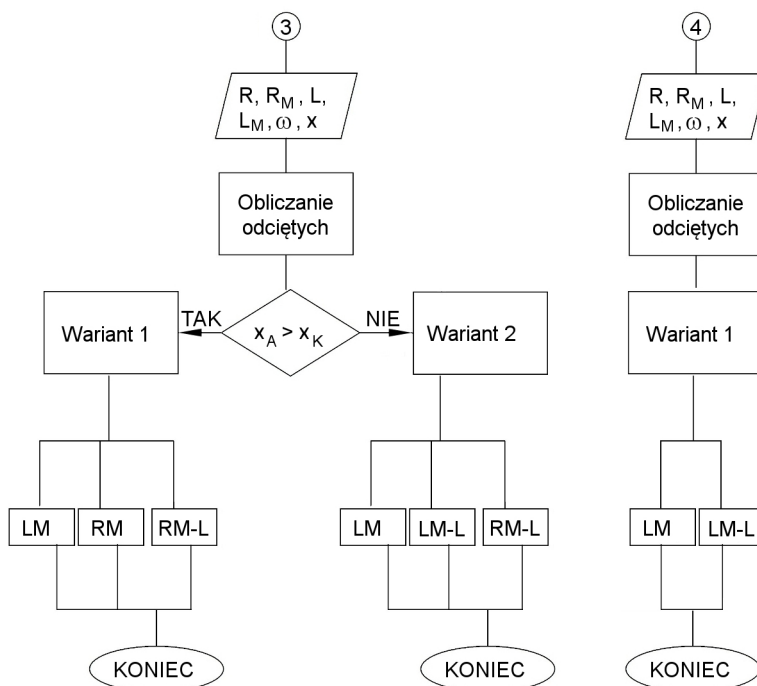
$$x_{sM} = L_M - R_M \sin \xi_M \quad (4.26)$$

Styczną główną istniejącego łuku parabolicznego można wyznaczyć za pomocą wyrażenia:

$$T_{0ip} = \operatorname{tg} \frac{\omega}{2} (R + n) + L_i - R \sin \frac{\omega}{2} \quad (4.27)$$

Odciętą punktu K, końca projektowanej krzywej przejściowej wyznacza się z zależności (4.17).

W opisywanym przypadku występuje symetria układu, więc przesunięcia układu są obliczane do punktu S, który wyznacza środek łuku o promieniu R_M . Odcięta punktu S wyznaczana jest za pomocą wyrażenia (4.18).



Rys. 4.17. Schemat algorytmu wyznaczającego przesunięcia osi toru (projektowanego względem istniejącego) z podziałem na warianty obliczeniowe – przypadek istniejącego łuku parabolicznego i projektowanego: 3 – łuku kołowego z krzywymi przejściowymi; 4 – łuku parabolicznego

Dodatkowo można wyznaczyć wartości odciętych znajdujących się w charakterystycznych punktach układu projektowanego. Odciętą x_E , czyli odległość od początku układu współrzędnych do końca łuku parabolicznego, można obliczyć z zależności:

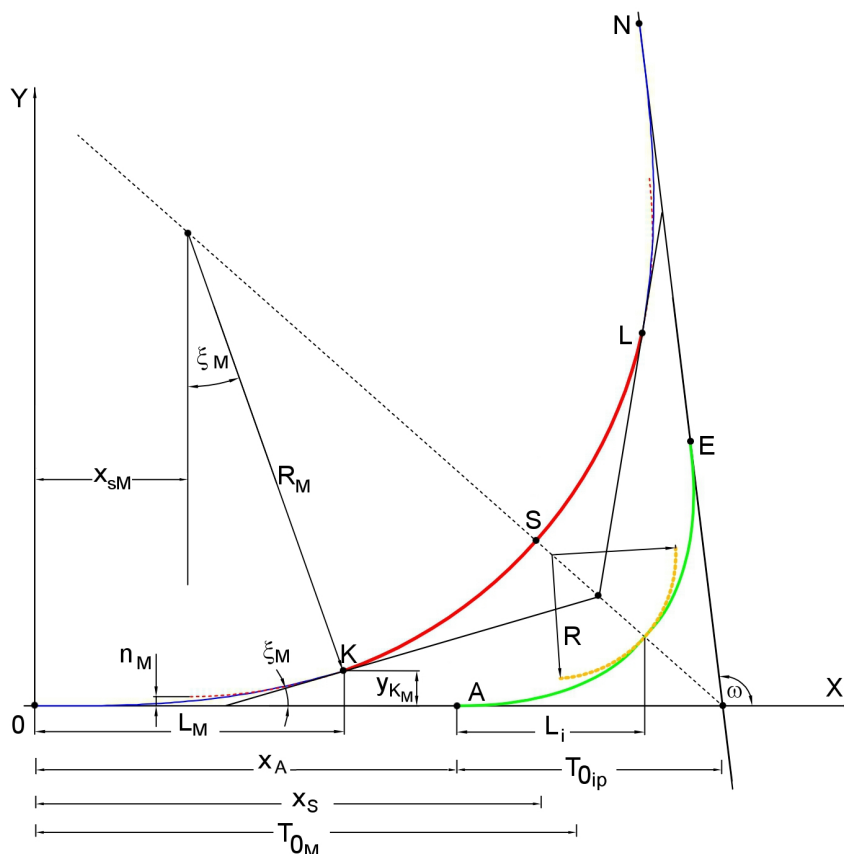
$$x_E = T_{0_{ip}} (1 + \cos \omega) + x_A \quad (4.28)$$

Analogicznie do przypadku łuku kołowego bez krzywych przejściowych można wyznaczyć wartości odciętych. Odciętą x_N końca łuku projektowanego opisuje zależność (4.24), natomiast wartość odciętej x_L końca łuku kołowego - początku drugiej krzywej przejściowej można wyznaczyć z zależności (4.23).

W drugim przypadku, to jest w przypadku zastępowania łuku parabolicznego innym łukiem parabolicznym, obliczenia przesunięć są wykonywane w jednym wariantcie z zastosowaniem modeli: **LM**, **LM-L**.

Istniejący układ geometryczny składa się z łuku parabolicznego; zaprojektowano nowy układ składający się również z łuku parabolicznego. Przesunięcia pomiędzy układem istniejącym i projektowanym będą liczone za pomocą dwóch modeli obliczeniowych:

- Model **LM** – przesunięcia projektowanej krzywej przejściowej względem osi odciętych (odcinka prostego toru) obliczane są od początku układu współrzędnych do punktu A (początek istniejącego łuku);



Rys. 4.18. Schemat istniejącego łuku parabolicznego (kolor zielony) i projektowanego łuku kołowego z krzywymi przejściowymi (kolor granatowy i czerwony) – obliczenia przesunięć osi toru według wariantu 1

- Model **LM-L** – przesunięcia projektowanej krzywej przejściowej L_M względem istniejącej krzywej L_i obliczane są w przedziale mieszczącym się pomiędzy odciętymi punktów A i K ;
Ze względu na symetrię układu przesunięcia są liczone do połowy układu projektowanego.

Odciętą punktu A (początek istniejącego łuku parabolicznego) można wyznaczyć za pomocą zależności (4.25). Dla projektowanego łuku parabolicznego styczna główna T_{0M} wynosi:

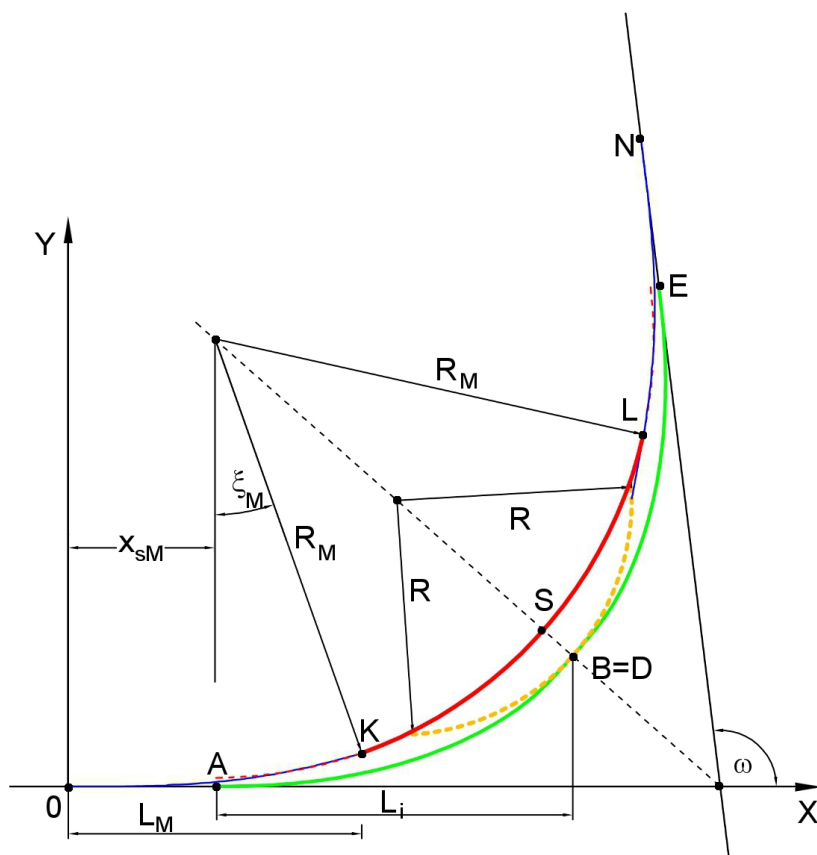
$$T_{0M} = \operatorname{tg} \frac{\omega}{2} (R_M + n_M) + L_M - R_M \sin \frac{\omega}{2} \quad (4.29)$$

Długość odciętej x_B środka istniejącego łuku parabolicznego opisuje równanie:

$$x_B = \frac{L}{2} + R \sin \xi + x_A \quad (4.30)$$

W opisywanym przypadku występuje symetria układu – przesunięcia są wyznaczone do punktu S , który w tym przypadku jest środkiem projektowanego łuku parabolicznego. Odciętą w punkcie S , a zarazem w punkcie K , można wyznaczyć za pomocą wyrażenia:

$$x_M = \frac{L_M}{2} + R_M \sin \xi_M \quad (4.31)$$

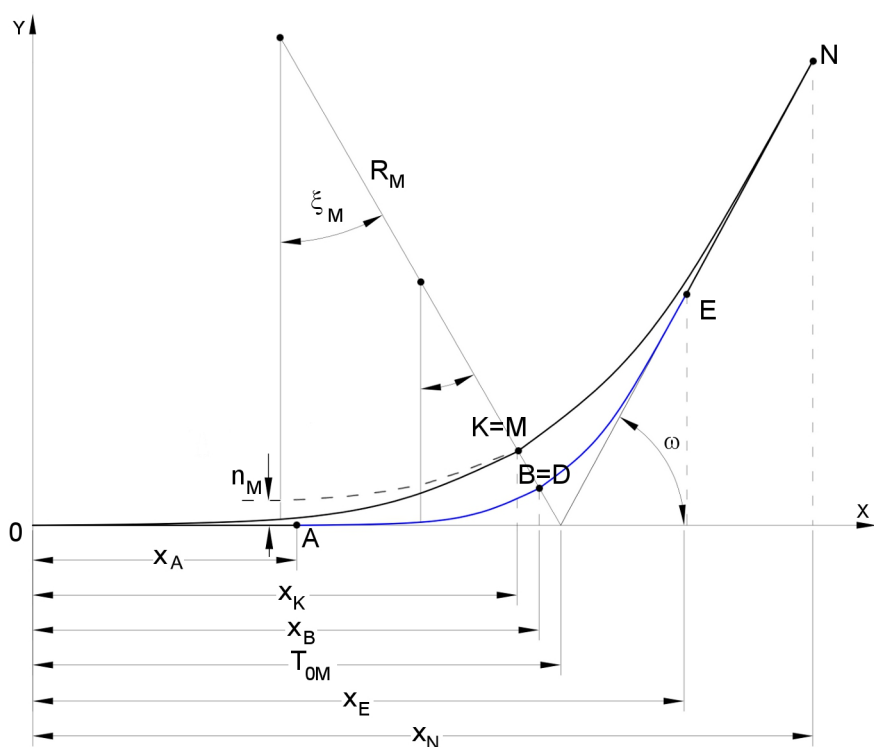


Rys. 4.19. Schemat istniejącego łuku parabolicznego (kolor zielony) i projektowanego łuku kołowego z krzywymi przejściowymi (kolor granatowy i czerwony) – obliczenia przesunięć osi toru według wariantu 2

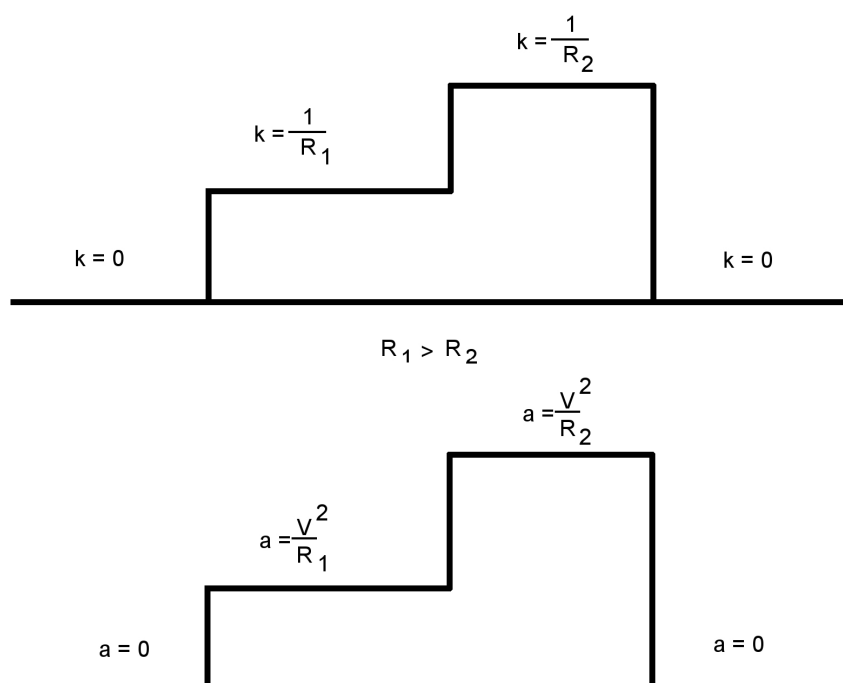
Odciętą końca istniejącego łuku x_E opisuje równanie (4.28), natomiast odciętą końca łuku projektowanego x_N wyznaczyć można z zależności (4.24).

4.5. Łuk koszowy

W opracowywanym algorytmie obliczeniowym przewidziano również analizę przypadku układu dwóch następujących po sobie łuków kołowych (krzywej koszowej lub łuku koszowego). Układ taki, w przeciwieństwie do układu zawierającego krzywe przejściowe, charakteryzuje się skokową zmianą wartości niezrównoważonego przyspieszenia odśrodkowego działającego na pasażera (rys. 4.21). Projektant może zastąpić istniejący łuk koszowy układem zawierającym krzywe przejściowe (np. w postaci paraboli 3-go stopnia) lub w szczególnym przypadku łukiem parabolicznym. W pracy uwzględniono również przypadek, w którym łuk koszowy może zostać przeprojektowany na inny łuk tego samego typu o innych parametrach geometrycznych. Taka sytuacja może być wykorzystywana głównie w projektowaniu tramwajowych układów torowych, gdzie powszechną praktyką jest stosowanie krzywych koszowych [27].



Rys. 4.20. Schemat łuku parabolicznego: istniejącego (kolor granatowy) i projektowanego (kolor czarny) – obliczenia przesunięć osi toru



Rys. 4.21. Wykres zmian krzywizny toru i przyspieszeń w płaszczyźnie poziomej dla łuku koszowego

4.5.1. Charakterystyka zastosowanych modeli

W opracowanym algorytmie skoncentrowano się na przypadku, w którym istniejący łuku kosztowy składa się z dwóch łuków kołowych o promieniach R_1 , R_2 bez krzywych przejściowych. W praktyce taki układ geometryczny jest często przyczyną ograniczenia prędkości z powodu dużych wartości przyrostu przyspieszenia. Jeżeli dodatkowo promienie łuków będą małe, może dojść również do przekroczenia dopuszczalnej wartości przyspieszenia. Aby uzyskać większą prędkość w takich warunkach geometrycznych, można zaprojektować w miejsce tego układu łuk kołowy z krzywymi przejściowymi lub łuk paraboliczny. Jak już wspomniano, został uwzględniony również przypadek, który może znaleźć zastosowanie w projektowaniu nowych układów torów tramwajowych – zastąpienie istniejącego łuku kosztowego innym łukiem kosztowym. Do obliczeń odsunięć osi toru projektowanego układu względem układu istniejącego wykorzystuje się cztery modele opisane w podrozdziale 4.1:

- Model **LM** – przesunięcia projektowanej krzywej przejściowej względem osi odciętych (odcinka prostego toru);
- Model **RM** – przesunięcia projektowanego łuku o promieniu R_M względem osi odciętych;
- Model **LM-R** – przesunięcia projektowanej krzywej przejściowej względem istniejącego łuku;
- Model **RM-R** – przesunięcia projektowanego łuku względem łuku istniejącego.

W tym przypadku należało zastosować dodatkowe modele, ponieważ łuki kosztowe są układami niesymetrycznymi. Procedura obliczania odsunięć osi toru projektowanego względem istniejącego wymaga zatem odmiennego podejścia. Istniejący łuk kosztowy został opisany za pomocą następujących danych:

- promienia łuku pierwszego R_1 ,
- promienia łuku drugiego R_2 ,
- kąta zwrotu trasy ω ,
- kąta zwrotu pierwszego łuku kołowego γ .

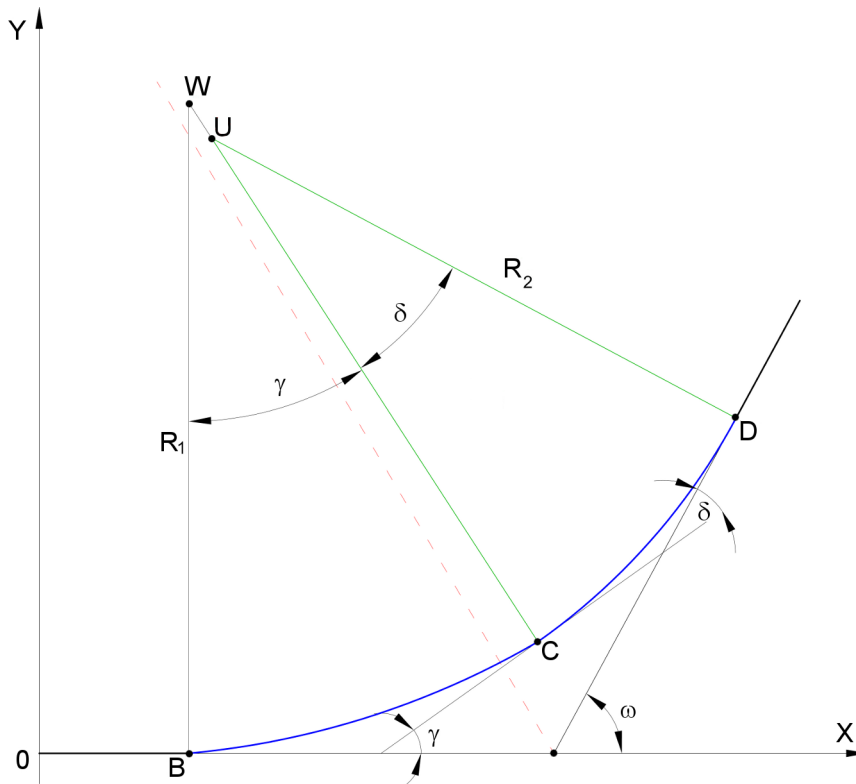
W praktyce dana jest zazwyczaj długość części kołowych obu łuków. W obliczeniach posłużono się wartością kąta zwrotu pierwszego łuku. Jak wiadomo, obliczenie kąta zwrotu przy danej długości odcinka kołowego można wyznaczyć z zależności:

$$\gamma = k_1 \frac{180}{R_1 \pi} \quad (4.32)$$

gdzie:

- γ kąt zwrotu pierwszego łuku kołowego w łuku kosztowym w $^\circ$,
- k_1 długość odcinka kołowego pierwszego łuku w m ,
- R_1 promień pierwszego łuku w m .

Pierwsza część istniejącego łuku kosztowego składa się zatem z łuku kołowego o promieniu R_1 o kącie zwrotu równym γ . Jego początek znajduje się punkcie B , a koniec w punkcie C . Drugi łuk kołowy o promieniu R_2 i kącie zwrotu δ ma początek w punkcie C i koniec w punkcie D . Kąt zwrotu łuku kosztowego, oznaczonego ω , jest sumą kątów γ i δ (rys. 4.22).



Rys. 4.22. Schemat istniejącego łuku kosztowego

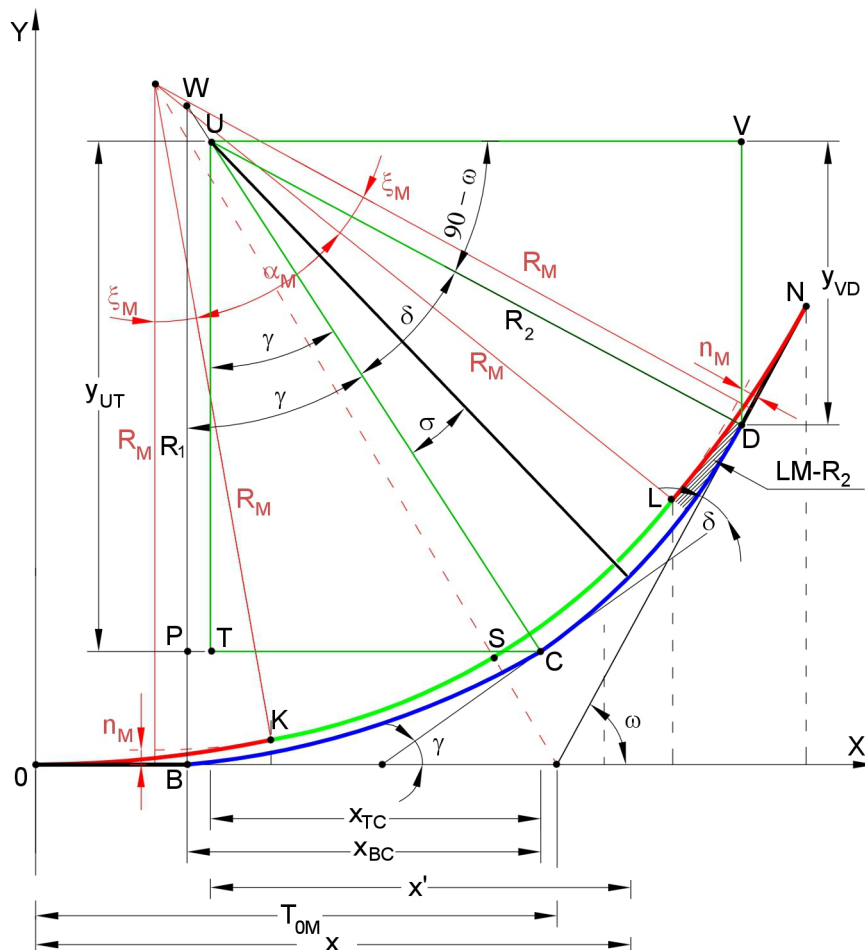
Dla modernizacji istniejącego układu, polegającej na zastąpieniu go łukiem kołowym z krzywymi przejściowymi na odcinku od punktu B do punktu C , czyli na długości drugiego łuku istniejącego (o promieniu R_2), wymagane jest zastosowanie dodatkowych modeli LM_2-R_2 i $RM-R_2$. Na długości drugiej projektowanej krzywej przejściowej za punktem D (końcem drugiego istniejącego łuku kołowego) obliczenia należy wykonać według modelu LM_2 . Natomiast na odcinku od punktu D do punktu L należy zastosować model RM_2 .

Dla przypadku, w którym istniejący łuk kosztowy jest zastępowany przez łuk paraboliczny, należy zastosować model $LM-R_2$, którego nazwa sugeruje obliczanie odsunięć osi toru pierwszej projektowanej krzywej przejściowej o długości L_M względem istniejącego drugiego łuku kołowego o promieniu R_2 , oraz model LM_2-R , w którym odsunięcia osi toru drugiej projektowanej krzywej przejściowej o długości L_M obliczane są względem istniejącego pierwszego łuku kołowego o promieniu R_1 .

Rozwiązania różnią się również, gdy projektowany jest nowy łuk kosztowy. Dla takiego przypadku pierwsza część projektowanego łuku kosztowego składa się z łuku kołowego o promieniu R_3 i kącie zwrotu równym γ . Jego początek znajduje się w punkcie O , a koniec w punkcie L . Drugi projektowany łuk kołowy o promieniu R_4 i kącie zwrotu δ ma początek w punkcie L i koniec w punkcie M . Na odcinku za punktem C układu istniejącego do obliczeń przyjęto nowe modele: R_3-R_2 , R_4-R_2 . Dla przypadku łuku kosztowego przyjęto również nowy model obliczający odsunięcie osi toru na wyznaczonym odcinku drugiego projektowanego łuku kołowego o promieniu R_4 – model R_4 .

Model LM₂-R₂

W opisywanym modelu do obliczenia wartości odsunięcia należy wyznaczyć rzędną na drugim łuku kołowym i rzędną drugiej projektowanej krzywej przejściowej. Wartość przesunięcia jest obliczana jako różnica tych rzędnych. Dla zobrazowania idei tego modelu posłużono się przypadkiem istniejącego łuku koszowego i projektowanego łuku kołowego z krzywymi przejściowymi o tej samej długości (rys. 4.23).



Rys. 4.23. Schemat istniejącego łuku koszowego (kolor granatowy) i projektowanego łuku kołowego z krzywymi przejściowymi (kolor czerwony i zielony) – wyznaczanie przesunięć osi toru dla modelu LM₂-R₂ (zakreskowany obszar)

Wartość przesunięcia wyznaczana jest z zależności:

$$w_{LM_2R_2} = y_{LM_2} - y_{R_2} \quad (4.33)$$

gdzie:

- y_{LM_2} rzędna drugiej projektowanej krzywej przejściowej w m ,
- y_{R_2} rzędna drugiego łuku kołowego R_2 w istniejącym łuku koszowym w m .

Rzędna projektowanej krzywej przejściowej, odpowiadającą odciętej x , opisuje wyrażenie:

$$y_{LM_2} = \frac{\left(\frac{T_{OM}(1+\cos\omega)-x}{\cos\omega} \right)^3}{6R_M L_M} + \text{tg}(x - T_{OM}) \quad (4.34)$$

gdzie:

T_{0M} długość stycznej głównej projektowanego łuku w m .

Rzędną drugiego łuku kołowego R_2 w istniejącym łuku koszowym na długości odciętej x można wyznaczyć z zależności:

$$y_{R_2} = y_{UT} - y_{VD} + R_1 (1 - \cos \gamma) \quad (4.35)$$

gdzie:

y_{UT} różnica rzędnych punktów U i T w m ,

y_{VD} różnica rzędnych punktów V i D w m .

Wartość y_{UT} wynosi:

$$y_{UT} = R_2 \cos \gamma \quad (4.36)$$

gdzie:

Wartość y_{VD} można opisać zależnością:

$$y_{VD} = R_2 \sin(90 - \gamma - \sigma) \quad (4.37)$$

gdzie:

σ kąt promienia wodzącego R_2 (rys. 4.23) w $^\circ$.

Wartość kąta σ opisuje zależność:

$$\sigma = \arctg \frac{x'}{R_2 \cos \gamma} - \gamma \quad (4.38)$$

Wartość x' dla promienia $R_1 > R_2$ wynosi:

$$x' = x - x_B + R_1 \sin \gamma - R_2 \sin \gamma \quad (4.39)$$

Wartość x' dla promienia $R_1 < R_2$ wynosi:

$$x' = x - x_B - R_1 \sin \gamma + R_2 \sin \gamma \quad (4.40)$$

Model LM₂

W opisywanym modelu należy wyznaczyć różnicę rzędnej drugiej projektowanej krzywej przejściowej i rzędnej stycznej głównej o kącie zwrotu ω :

$$w_{LM_2} = \frac{\left(\frac{T_{0M}(1+\cos \omega) - x}{\cos \omega} \right)^3}{6R_M L_M} \quad (4.41)$$

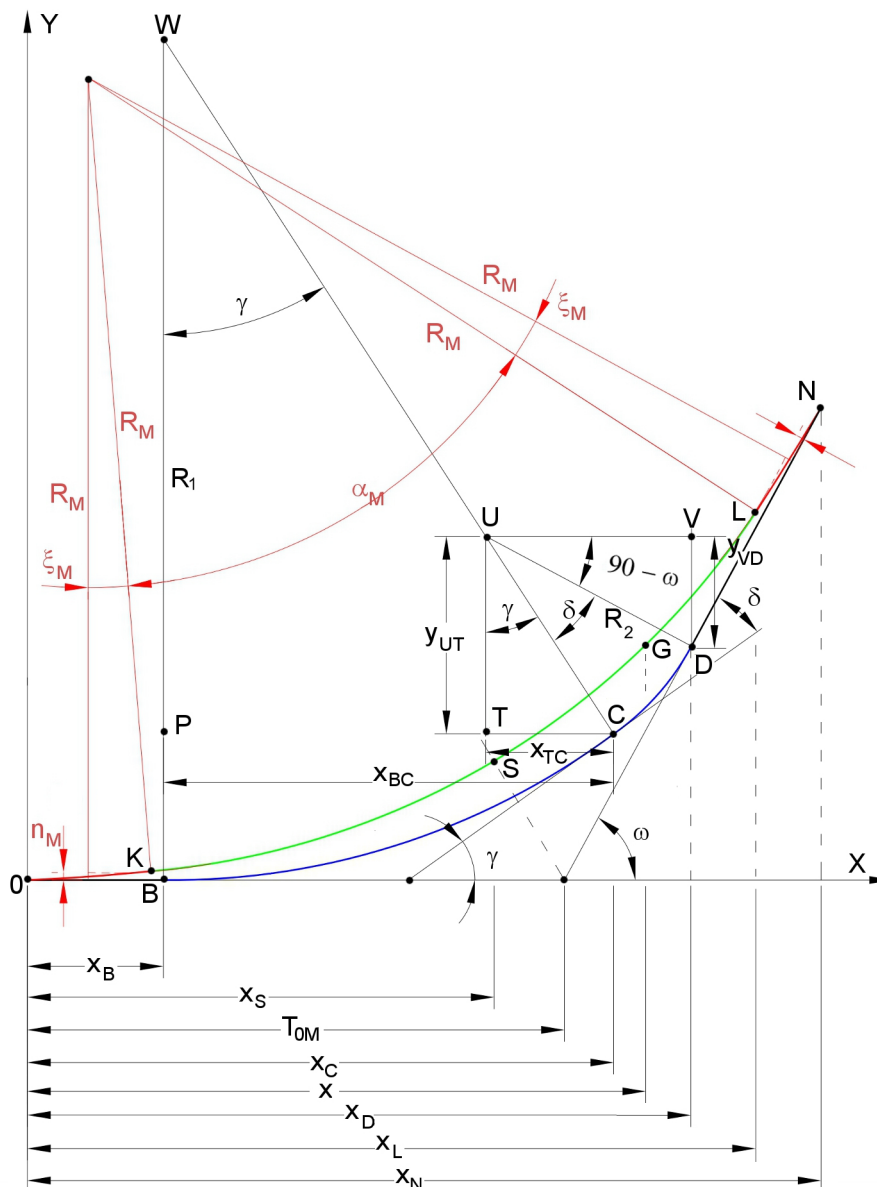
Model RM-R₂

Model RM-R₂ odnosi się do strefy obliczeń znajdującej się pomiędzy punktami C i D istniejącego łuku koszowego na długości projektowanego łuku kołowego o promieniu R_M (rys. 4.24). Przesunięcie osi toru jest liczone jako różnica rzędnej projektowanego łuku kołowego i rzędnej drugiego łuku w istniejącym łuku koszowym:

$$w_{RM-R_2} = y_G - y_{R_2} \quad (4.42)$$

gdzie:

- y_G rzędna projektowanego łuku kołowego odpowiadająca odciętej x opisana zależnością (4.12) w m ,
- y_{R_2} rzędna drugiego łuku kołowego R_2 w istniejącym łuku kosзовym opisana zależnością (4.35) w m .



Rys. 4.24. Schemat istniejącego łuku kosowego (kolor granatowy) i projektowanego łuku kołowego z krzywymi przejściowymi (kolor czerwony i zielony) – wyznaczenie przesunięć osi toru dla modelu **RM-R₂**

Model **RM₂**

Model **RM₂** odnosi się do strefy obliczeń znajdującej się pomiędzy punktami D i L na długości projektowanego łuku kołowego o promieniu R_M . Przesunięcie będzie liczone jako różnica rzędnej projektowanego łuku kołowego i rzędnej stycznej głównej o kącie zwrotu ω :

$$w_{RM2} = y_G - \operatorname{tg} \omega (x - T_{0M}) \quad (4.43)$$

gdzie:

- y_G rzędna projektowanego łuku kołowego odpowiadająca odciętej x opisana zależnością (4.12) w m ,
 T_{OM} styczna główna projektowanego łuku opisana zależnością (4.20) w m .

Model LM-R₂

W opracowanym algorytmie model LM-R₂ może wystąpić, gdy projektowany jest łuk paraboliczny. Na początku należy wyznaczyć rzędną na drugim łuku kołowym o promieniu R_2 i rzędną pierwszej projektowanej krzywej przejściowej L_M . Wartość przesunięcia osi toru projektowanego od istniejącego jest obliczana jako różnica tych rzędnych:

$$w_{LM-R_2} = y_{LM} - y_{R_2} \quad (4.44)$$

gdzie:

- y_{LM} rzędna projektowanej krzywej przejściowej wyznaczona z równania (4.1) w m .

Model LM₂-R

W opisywanym modelu do obliczenia wartości odsunięcia należy wyznaczyć rzędną na pierwszym łuku kołowym o promieniu R_1 i rzędną drugiej projektowanej krzywej przejściowej L_M . Przypadek może wystąpić, gdy projektowany jest łuk paraboliczny. Wartość przesunięcia jest obliczana jako różnica tych rzędnych.

$$w_{LM_2-R} = w_{LM_2} - y_R \quad (4.45)$$

gdzie:

- y_R rzędna pierwszej części łuku koszowego R_1 w m ,
 w_{LM_2} rzędna drugiej projektowanej krzywej przejściowej wyznaczona z równania (4.41) w m .

Rzędna pierwszej części istniejącego łuku koszowego R_1 :

$$y_R = R_1 (1 - \cos \alpha_1) \quad (4.46)$$

gdzie:

- α_1 kąt pierwszej części łuku koszowego o promieniu R_1 wyrażony zależnością $\alpha_1 = \arcsin \frac{x}{R_1} [^\circ]$.

Model R₃-R₂

Model R₃-R₂ dotyczy przypadku, w którym istniejący łuk koszowy zastępuje się innym łukiem koszowym. Obliczenia przesunięć dla tego modelu wykonywane są na długości, w której występuje zarówno pierwsza część projektowanego łuku koszowego (odcinek OL) jak i druga część istniejącego łuku koszowego (odcinek CD). Wartości przesunięć w tym przedziale obliczane są jako różnica rzędnych pierwszego projektowanego łuku kołowego R_3 i drugiego istniejącego łuku kołowego:

$$w_{R_3R_2} = y_{R_3} - y_{R_2} \quad (4.47)$$

gdzie:

y_{R_2} rzędna drugiego łuku kołowego R_2 w istniejącym łuku koszowym opisana zależnością (4.35) w m ,

y_{R_3} rzędna pierwszego projektowanego łuku kołowego R_3 w m .

Rzędną pierwszego projektowanego łuku kołowego opisuje równanie:

$$y_{R_3} = R_3 \left(1 - \cos \left(\arctg \frac{x}{R_3} \right) \right) \quad (4.48)$$

Model R_4-R_2

Model R_4-R_2 służy do obliczania przesunięć drugiej części projektowanego łuku koszowego o promieniu R_4 i drugiej części istniejącego łuku koszowego o promieniu R_2 . Odsunięcia liczone są jako różnica rzędnych tych dwóch łuków dla odciętej x .

$$w_{R_4R_2} = y_{R_4} - y_{R_2} \quad (4.49)$$

gdzie:

y_{R_2} rzędna drugiego łuku kołowego R_2 w istniejącym łuku koszowym opisana zależnością (4.35) w m ,

y_{R_4} rzędna drugiego projektowanego łuku kołowego R_4 w m .

Wartość rzędnej dla drugiego łuku projektowanego liczona jest analogicznie jak dla łuku istniejącego, przy czym podstawiane są wartości dotyczące układu projektowanego.

Model R_4

Model R_4 dotyczy przypadku, w którym istniejący łuk koszowy jest zastępowany łukiem koszowym. W modelu tym obliczane są wartości przesunięć projektowanego łuku o promieniu R_4 względem drugiej stycznej projektowanego układu (odcinka prostego toru istniejącego).

$$w_{R_4} = R_4 \left[1 - \cos \left(\arctg \frac{T_{0M2} \cos(\omega) - \frac{x-T_{0M}}{\cos(\omega)}}{R_4} \right) \right] \quad (4.50)$$

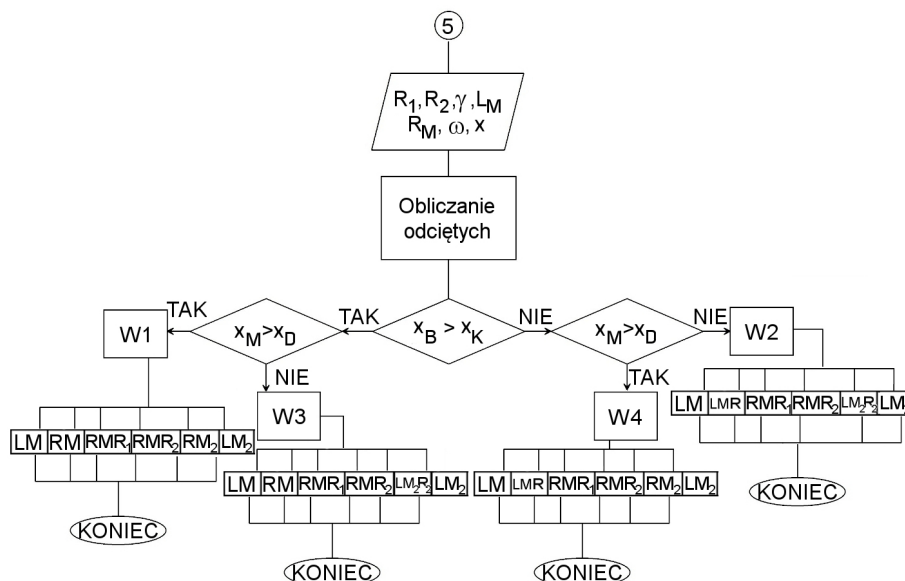
gdzie:

T_{0M2} druga styczna główna projektowanego łuku koszowego w m .

Przypadek zastosowania łuku kołowego z krzywymi przejściowymi

Podobnie jak w przypadku omawianym w podrozdziale 4.2 modernizacja istniejącego układu geometrycznego polegająca na zastąpieniu łuku koszowego łukiem kołowym z krzywymi przejściowymi wymaga zdefiniowania wariantów, według których będą wyznaczone odsunięcia osi toru. Wybór wariantu uzależniony jest od wartości odciętych punktów B i K . Dla takiego przypadku możliwe jest wystąpienie czterech różnych wariantów obliczeniowych.

Wariant 1 wystąpi, gdy wartość odciętej punktu K (końca projektowanej krzywej przejściowej) jest mniejsza od wartości odciętej punktu B (początek łuku koszowego) i wartość odciętej punktu D (koniec drugiego łuku kołowego) jest mniejsza od wartości odciętej punktu M (koniec drugiej krzywej przejściowej). Obliczenia wykonywane są według modeli: **LM**, **RM**, **RM-R**, **RM- R_2** , **RM $_2$** , **LM $_2$** (rys. 4.26).



Rys. 4.25. Schemat algorytmu wyznaczającego przesunięcia osi toru (projektowanego względem istniejącego) z podziałem na warianty obliczeniowe – przypadek istniejącego łuku kosztowego i projektowanego łuku kołowego z krzywymi przejściowymi

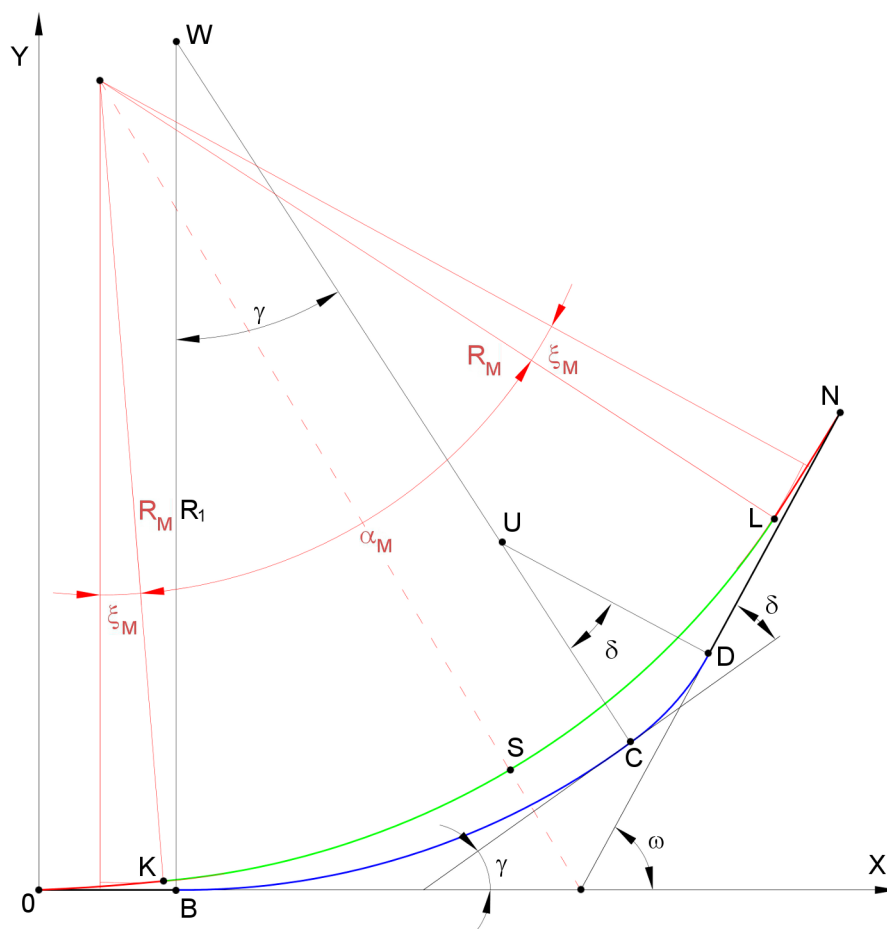
Wariant 2 obejmuje przypadki, gdy odcięta punktu K jest większa od odciętej punktu B i wartość odciętej punktu D jest dłuższa od odciętej punktu M . Obliczenia wykonywane są według modeli: LM , $LM-R$, $RM-R$, $RM-R_2$, LM_2-R_2 , LM_2 (rys. 4.27).

Wariant 3 wystąpi, gdy wartość odciętej punktu K jest mniejsza od odciętej punktu B i wartość odciętej punktu D jest większa niż odciętej punktu M . Obliczenia wykonywane są według modeli: LM , RM , $RM-R$, $RM-R_2$, LM_2-R_2 , LM_2 (rys. 4.28).

Wariant 4 obejmuje przypadki, gdy odcięta punktu K jest większa od odciętej B i odcięta punktu D jest ma wartość mniejszą niż odcięta punktu M . Obliczenia wykonywane są według modeli: LM , $LM-R$, $RM-R$, $RM-R_2$, RM_2 , LM_2 (rys. 4.29).

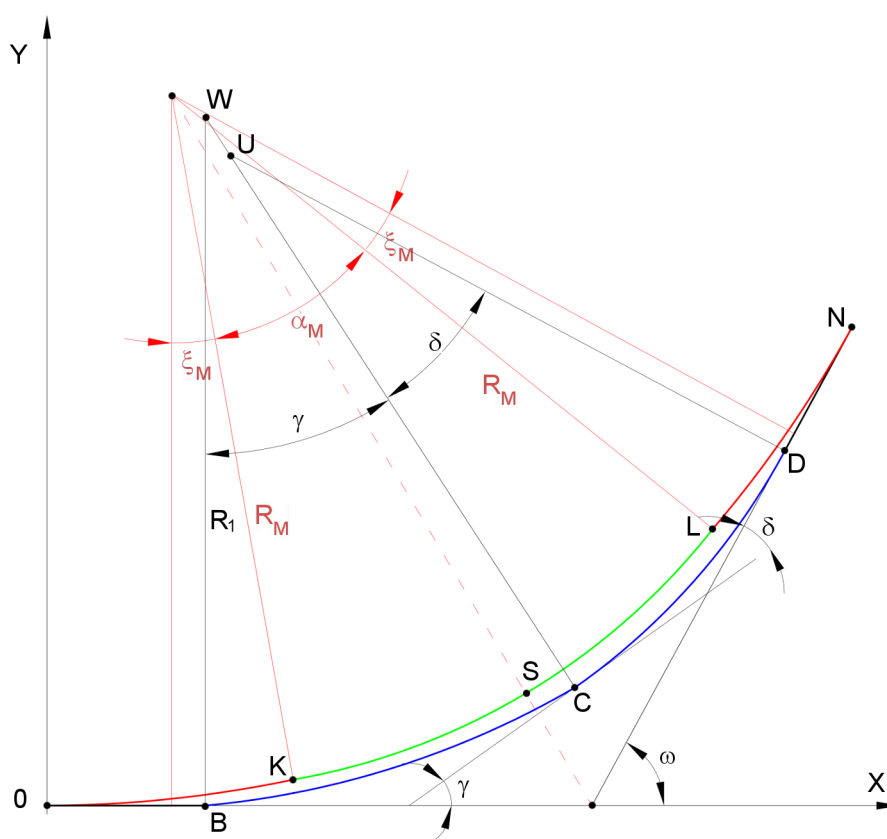
Istniejący łuk kosztowy BCD w przyjętym układzie współrzędnych XY zastąpiono przez projektowany układ składający się z łuku kołowego o promieniu R_M z symetrycznymi krzywymi przejściowymi w postaci paraboli trzeciego stopnia o długości L_M . W omawianym przypadku zastosowane zostały następujące modele:

- Model LM – przesunięcia projektowanej krzywej przejściowej o długości L_M względem osi odciętych liczone są dla wariantów 1 i 3 na odcinku OK , dla wariantów 2 i 4 na odcinku OB ;
- Model RM – przesunięcia projektowanego łuku o promieniu R_M względem prostego odcinka toru dla wariantów 1 i 3 na odcinku KB ;
- Model $LM-R$ – przesunięcia projektowanej krzywej przejściowej względem pierwszej części istniejącego łuku o promieniu R_1 , obliczenia wykonywane są dla wariantów 2 i 4 na odcinku BK ;
- Model $RM-R$ – przesunięcia projektowanego łuku o promieniu R_M względem istniejącego łuku o promieniu R_1 wyznaczone są dla wariantów 1 i 3 na odcinku BC , dla wariantów 2 i 4 na odcinku KC ;



Rys. 4.26. Schemat istniejącego łuku koszego (kolor granatowy) i projektowanego łuku kołowego z krzywymi przejściowymi (kolor czerwony i zielony) – obliczanie przesunięć osi toru według wariantu 1

- Model **RM-R₂** – przesunięcia projektowanego łuku o promieniu R_M względem istniejącego łuku o promieniu R_2 wyznaczone są dla wariantów 1 i 4 na odcinku CD , dla wariantów 2 i 3 na odcinku CM ;
- Model **LM-R₂** – przesunięcia projektowanej krzywej przejściowej względem drugiej części łuku istniejącego o promieniu R_2 obliczane są dla wariantów 2 i 3 na odcinku MS ;
- Model **LM₂-R₂** – przesunięcia drugiej projektowanej krzywej przejściowej względem drugiej części łuku istniejącego o promieniu R_2 obliczane są dla wariantów 2 i 3 na odcinku SD ;
- Model **RM₂** – przesunięcia projektowanego łuku o promieniu R_M względem prostego odcinka toru dla wariantów 1 i 4 na odcinku DM ;
- Model **LM₂** – przesunięcia drugiej projektowanej krzywej przejściowej względem osi odciętych wyznaczone są dla wariantów 1 i 4 na odcinku MN , dla wariantów 2 i 3 na odcinku DN .



Rys. 4.27. Schemat istniejącego łuku koszowego (kolor granatowy) i projektowanego łuku kołowego z krzywymi przejściowymi (kolor czerwony i zielony) – obliczanie przesunięć osi toru według wariantu 2

Kąt zwrotu γ pierwszej części kołowej (BC) łuku koszowego jest znany, tak więc odcięta punktu B, tj. początku istniejącego łuku koszowego, wynosi:

$$x_B = T_{0M} - \left(t_1 + \frac{y_1}{\operatorname{tg} \gamma} - \frac{y_1}{\operatorname{tg} \omega} \right) \quad (4.51)$$

gdzie:

t_1 jest styczną do pierwszej części łuku koszowego opisaną zależnością:

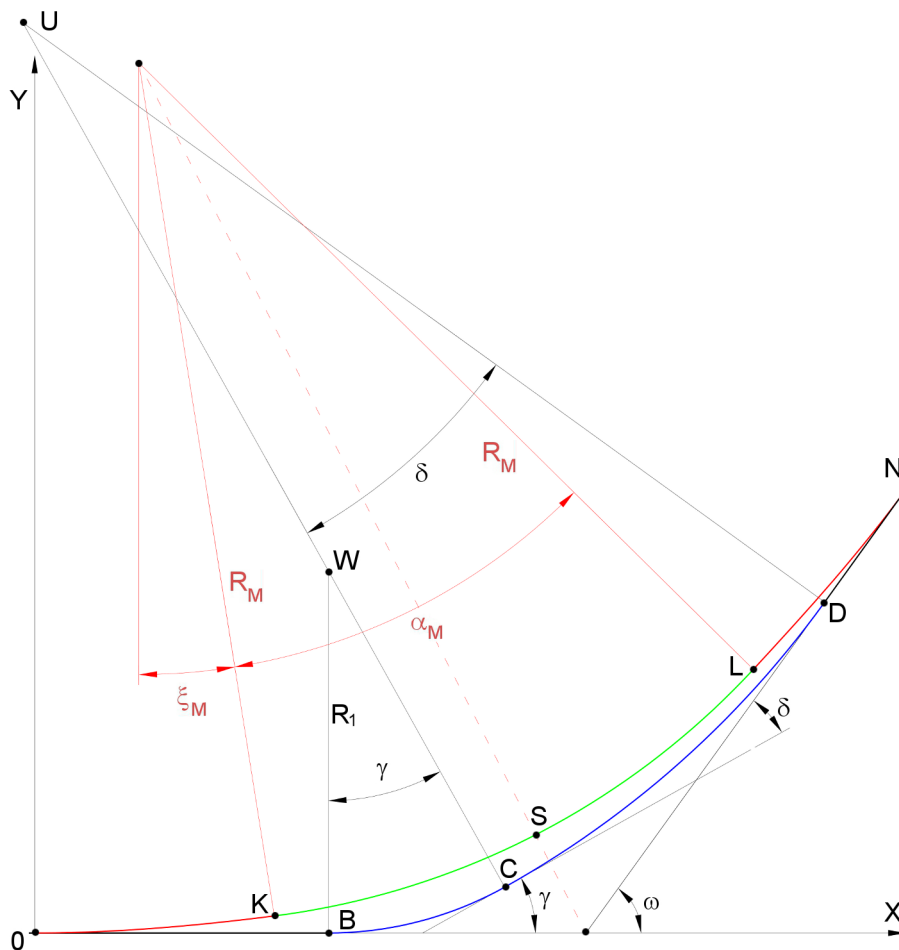
$$t_1 = R_1 \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}, \quad (4.52)$$

y_1 opisuje wyrażenie:

$$y_1 = \sin \gamma (t_1 + t_2), \quad (4.53)$$

t_2 jest styczną do drugiej części łuku koszowego opisaną zależnością:

$$t_2 = R_2 \operatorname{tg} \frac{\omega - \gamma}{2}. \quad (4.54)$$



Rys. 4.28. Schemat istniejącego łuku koszowego (kolor granatowy) i projektowanego łuku kołowego z krzywymi przejściowymi (kolor czerwony i zielony) – obliczanie przesunięć osi toru według wariantu 3

Wartość odciętej punktu K , wyznaczającej koniec projektowanej krzywej przejściowej, można opisać zależnością (4.17). W punkcie C następuje zmiana promienia łuku koszowego. Wartość odciętej x_C można wyznaczyć z wyrażenia:

$$x_C = x_B + t_1 + t_1 \cos \gamma \quad (4.55)$$

Odciętą punktu L , czyli końca kołowej części projektowanego łuku, można wyznaczyć z równania:

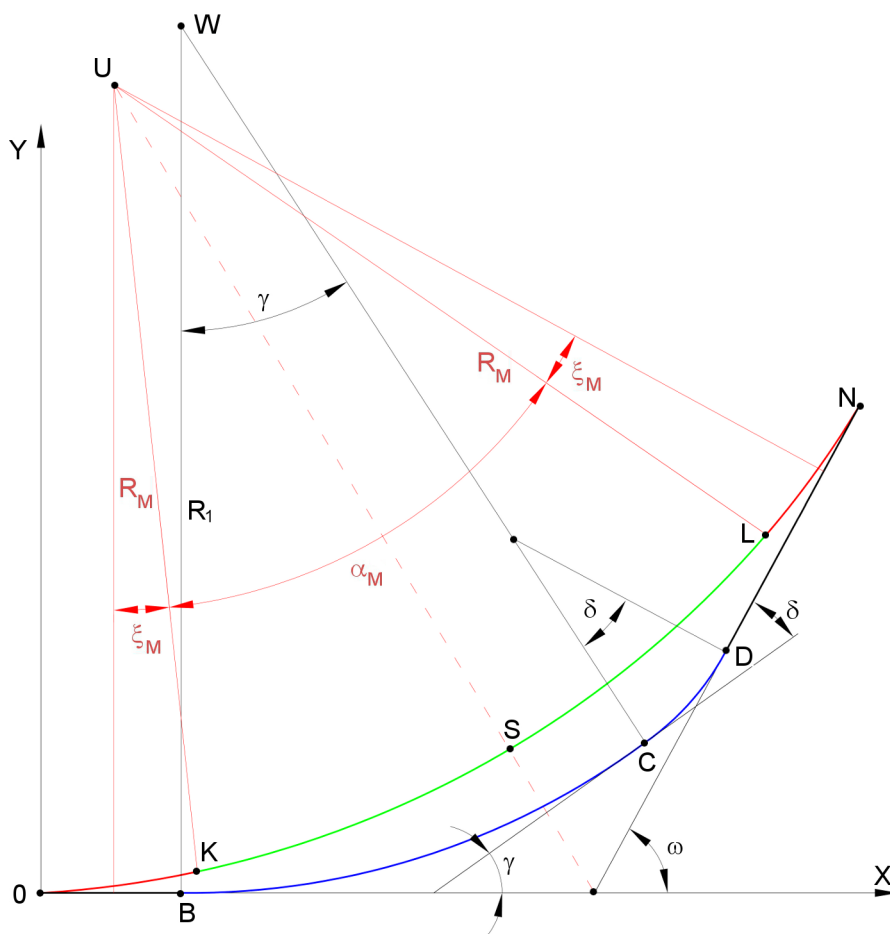
$$x_L = x_N - \frac{2L_M \cos \omega}{3} - \frac{L_M}{3 \cos \xi_M} \cos(\omega - \xi_M) \quad (4.56)$$

gdzie:

$$\xi_M = \arctg\left(\frac{L_M}{2R_M}\right). \quad (4.57)$$

Drugi istniejący łuk kołowy kończy się w punkcie D . Odcięta x_D wynosi:

$$x_D = t_1 + \frac{y_1}{\operatorname{tg} \gamma} + x_B + t_2 \cos \omega \quad (4.58)$$



Rys. 4.29. Schemat istniejącego łuku koszowego (kolor granatowy) i projektowanego łuku kołowego z krzywymi przejściowymi (kolor czerwony i zielony) – obliczanie przesunięć osi toru według wariantu 4

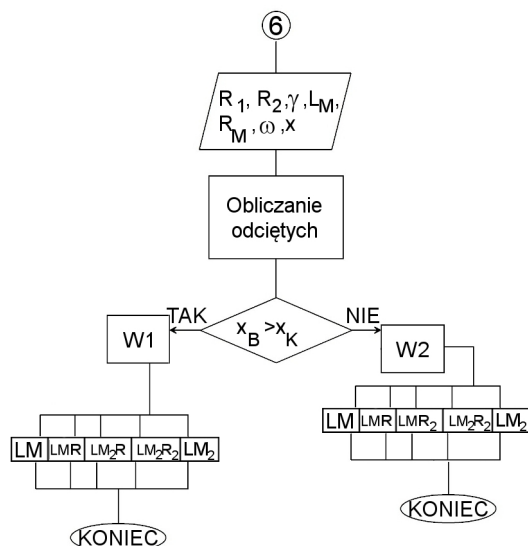
Ostatnią obliczaną w tym przypadku długością jest odcięta punktu N , czyli końca projektowanego układu. Wartość tej odciętej opisuje zależność:

$$x_N = T_{0M} (1 + \cos \omega) \quad (4.59)$$

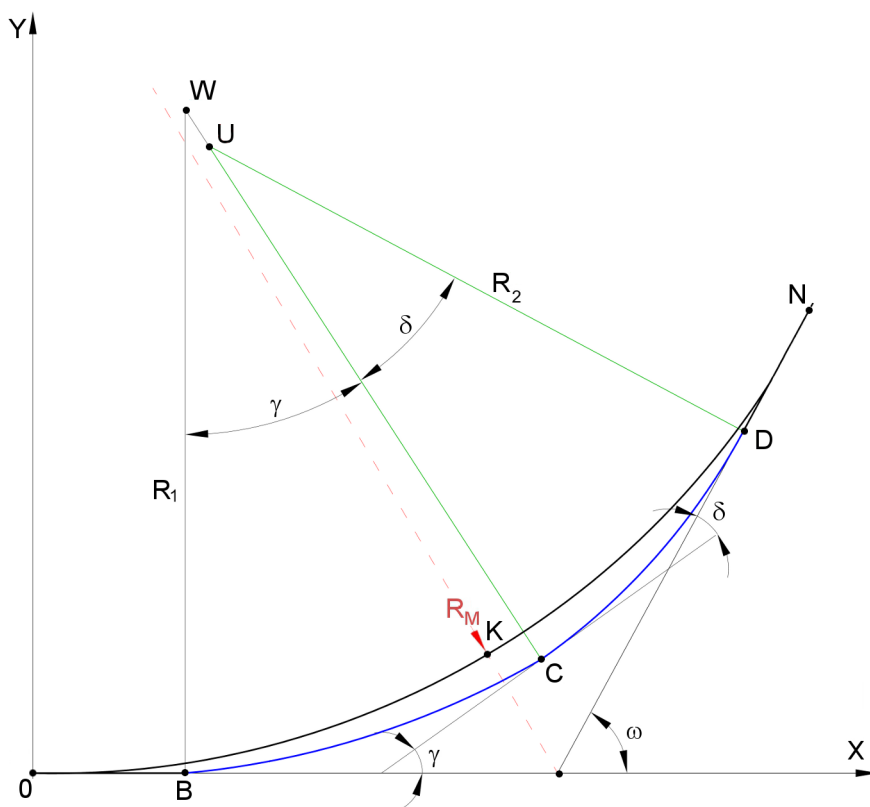
Przypadek zastosowania łuku parabolicznego

Układ istniejący można również zastąpić poprzez zaprojektowanie łuku parabolicznego. Wyznaczenie odsunięć osi toru dla tego przypadku wymaga zdefiniowania dwóch możliwych do wystąpienia wariantów obliczeniowych. Podobnie jak we wszystkich obliczanych przypadkach, podział na warianty uzależniony jest od wartości odciętych punktów charakterystycznych układu istniejącego i układu projektowanego.

Wariant 1 wystąpi, gdy wartość odciętej punktu K jest mniejsza niż odcięta punktu C (końca pierwszej części istniejącego łuku koszowego). Obliczenia przesunięć dla wariantu 1 będą wyznaczone za pomocą modeli: LM , $LM-R$, LM_2-R , LM_2-R_2 , LM_2 (rys. 4.31).



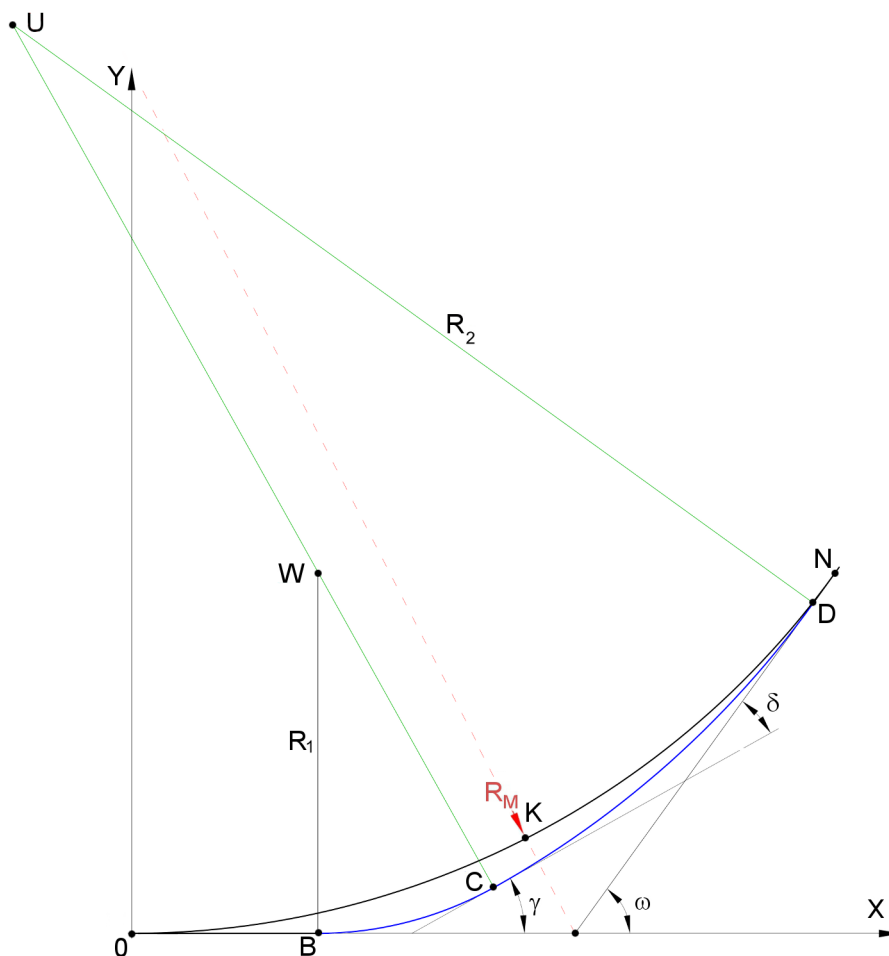
Rys. 4.30. Schemat algorytmu wyznaczającego przesunięcia osi toru (projektowanego względem istniejącego) z podziałem na warianty obliczeniowe – przypadek istniejącego łuku koszowego i projektowanego łuku parabolicznego



Rys. 4.31. Schemat istniejącego łuku koszowego (kolor granatowy) i projektowanego łuku parabolicznego (kolor czarny) – obliczanie przesunięć osi toru według wariantu 1

Wariant 2 odnosi się do sytuacji, w której odcięta punktu K ma większą wartość niż odciętej punktu C (rys. 4.32). Do obliczania przesunięć przyjęto modele: LM ,

LM-R, LM-R₂, LM₂-R₂, LM₂. Dla zaproponowanych wariantów zostały przypisane

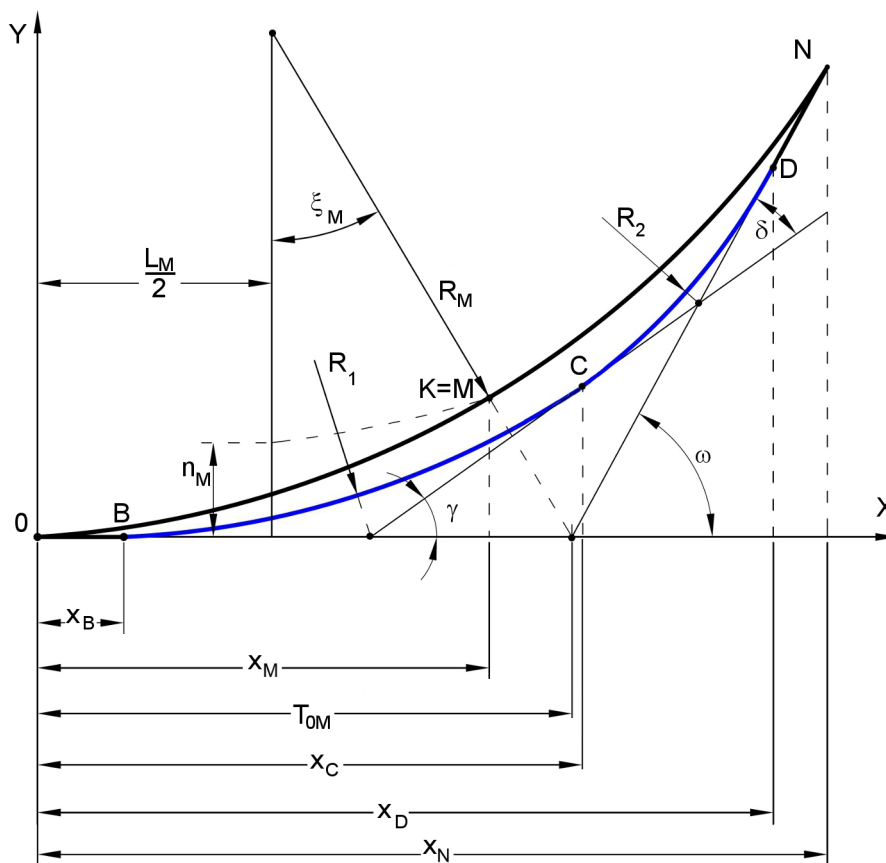


Rys. 4.32. Schemat istniejącego łuku kosowego (kolor granatowy) i projektowanego łuku parabolicznego (kolor czarny) – obliczanie przesunięć osi toru według wariantu 2

odpowiednie modele obliczeniowe. Obliczenia odsunięć osi toru wyznaczone są według następujących modeli:

- Model **LM** – przesunięcia projektowanej krzywej przejściowej o długości L_M względem osi odciętych liczone są dla obu wariantów na odcinku OB ;
- Model **LM-R** – przesunięcia projektowanej krzywej przejściowej względem pierwszej części istniejącego łuku o promieniu R_1 ; obliczenia dla wariantu 1 wykonywane są na odcinku BK , natomiast dla wariantu 2 na odcinku BC ;
- Model **LM₂-R** – przesunięcia drugiej projektowanej krzywej przejściowej względem pierwszej części istniejącego łuku o promieniu R_1 obliczane są wyłącznie dla wariantu 1 na odcinku KC ;
- Model **LM-R₂** – przesunięcia projektowanej krzywej przejściowej względem drugiej części łuku istniejącego o promieniu R_2 obliczane są w wariantie 2 na odcinku CK ;
- Model **LM₂-R₂** – przesunięcia drugiej projektowanej krzywej przejściowej względem drugiej części łuku istniejącego o promieniu R_2 obliczane są dla wariantu 1 od punktu C do punktu D , zaś dla wariantu 2 na odcinku KD ;

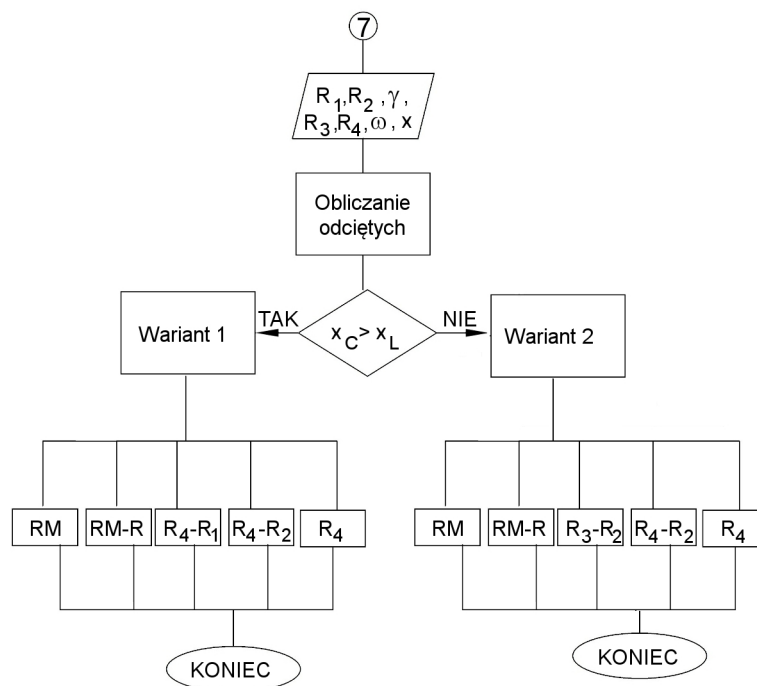
- Model LM_2 - przesunięcia drugiej projektowanej krzywej przejściowej względem osi odciętych wyznaczone są w obu wariantach na odcinku DN .



Rys. 4.33. Schemat istniejącego łuku koszowego (kolor granatowy) i projektowanego łuku parabolicznego (kolor czarny)

Wyznaczenie odsunięć osi toru wymaga przyporządkowania zaprojektowanych układów do odpowiednich wariantów. Dlatego należy wyznaczyć wartości odciętych odpowiednich punktów charakterystycznych. W tym przypadku projektowany układ to łuk paraboliczny, który składa się z dwóch krzywych przejściowych (parabol 3-go stopnia) o długości L_M i promieniu R_M , zaś układ istniejący to łuk koszowy złożony z dwóch łuków kołowych o promieniach R_1 i R_2 . Początki projektowanych krzywych znajdują się w punktach 0 i N, a ich koniec – w punkcie M (rys. 4.33).

Długość stycznej głównej projektowanego układu T_{0M} opisuje zależność (4.29). Wartość odciętej punktu C na istniejącym łuku koszowym obliczana jest z zależności (4.55). Górną granicę pierwszej strefy obliczeń, czyli odciętą x_B , wyznacza się z równania (4.51), zaś długość odciętej x_M obliczana jest za pomocą wyrażenia (4.31). Wartość odciętej punktu D, oznaczona jako x_D , określona jest równaniem (4.58). Wartość odciętej x_N punktu N opisującego koniec projektowanego łuku parabolicznego określa zależność (4.59).



Rys. 4.34. Schemat algorytmu wyznaczającego przesunięcia osi toru (projektowanego względem istniejącego) z podziałem na warianty obliczeniowe – przypadek istniejącego i projektowanego łuku koszowego

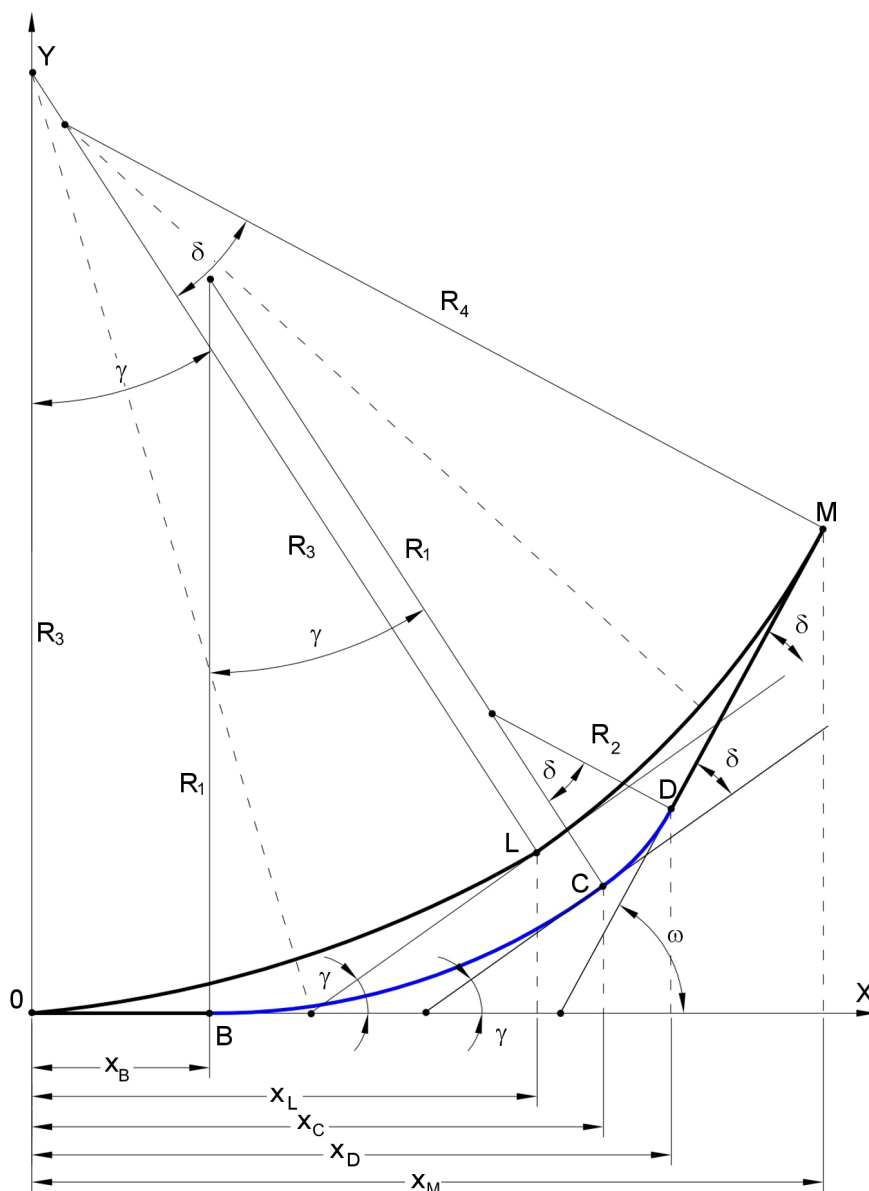
Przypadek zastosowania łuku koszowego

Właściwe przyporządkowanie do wariantów obliczeniowych musi zostać wykonane również przy obliczeniach odsunięć osi toru dla tego przypadku. Układ istniejący zostanie przeprojektowany poprzez zmianę wartości promieni i długości obu łuków. Podział na warianty zależy również od wartości odciętych charakterystycznych punktów układu istniejącego i projektowanego. W omawianym przypadku mogą wystąpić dwa warianty obliczeń odsunięć osi toru (rys. 4.34). Wariant 1 (rys. 4.35) wystąpi, gdy długość odciętej x_L (koniec pierwszej części projektowanego łuku koszowego) jest mniejsza od odciętej x_C (końca pierwszej części istniejącego łuku). Do wyznaczania przesunięć zastosowano modele: **RM**, **RM-R**, **R_4-R_1** , **R_4-R_2** , **R_4** .

Obliczenia przesunięć w wariantie 2 wykonuje się, gdy wartość odciętej x_L jest większa od odciętej x_C (rys. 4.36). Wówczas do obliczeń przyjmuje się modele: **RM**, **RM-R**, **R_3-R_2** , **R_4-R_2** , **R_4** .

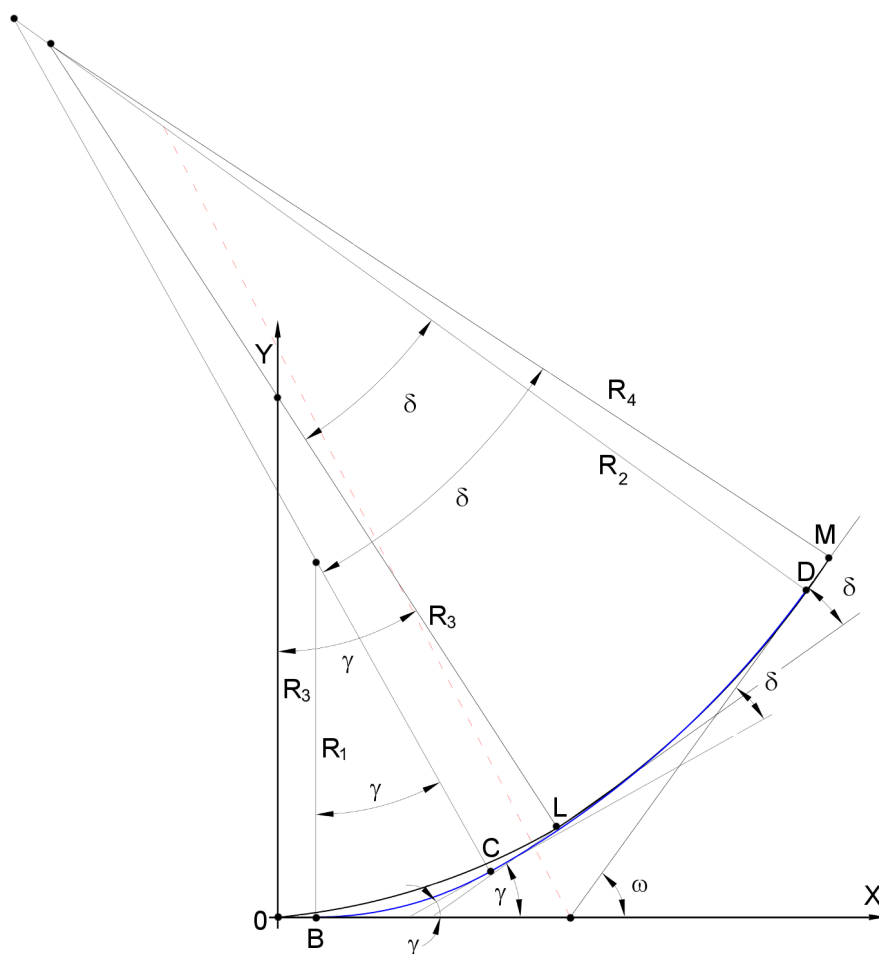
Po określeniu wariantów można przystąpić do wykonywania obliczeń zgodnie z proponowanymi modelami obliczeniowymi. Omawiany przypadek zakłada zastąpienie istniejącego łuku koszowego BCD o promieniach R_1 i R_2 nowym łukiem koszowym OMN o promieniach R_3 i R_4 . Do obliczenia odsunięć osi toru przyjęto następujące modele (rys. 4.35):

- Model **RM** – przesunięcia projektowanego łuku o promieniu R_3 względem prostego odcinka toru dla obu wariantów są obliczane na odcinku OB ;



Rys. 4.35. Schemat łuku koszowego: istniejącego (kolor granatowy) i projektowanego (kolor czarny) – obliczanie przesunięć osi toru według wariantu 1

- Model **RM-R** – przesunięcia projektowanego łuku o promieniu R_3 względem istniejącego łuku o promieniu R_1 wyznaczone są w przypadku wariantu 1 na odcinku BL zaś dla wariantu 2 od punktu B do punktu C ;
- Model **R_4-R_1** – przesunięcia projektowanego łuku o promieniu R_4 względem istniejącego łuku o promieniu R_1 wyznaczone są wyłącznie dla wariantu 1 na odległości od punktu L do punktu C ;
- Model **R_3-R_2** – przesunięcia projektowanego łuku o promieniu R_3 względem istniejącego łuku o promieniu R_2 obliczane są w wariantie 2 na odcinku CL ;
- Model **R_4-R_2** – przesunięcia projektowanego łuku o promieniu R_4 względem istniejącego łuku o promieniu R_2 obliczane są w wariantie 1 na odcinku CD , zaś dla wariantu 2 na odcinku LD ;



Rys. 4.36. Schemat łuku koszowego: istniejącego (kolor granatowy) i projektowanego (kolor czarny) – obliczanie przesunięć osi toru według wariantu 2

- Model R_4 - przesunięcia projektowanego łuku o promieniu R_4 względem prostego odcinka toru obliczane są dla obu wariantów na odcinku DM .

Procedura podziału na warianty obliczeniowe wymaga wyznaczenia odciętych punktów charakterystycznych. Dla tego przypadku wyznacza się odcięte dla pięciu różnych punktów. Wartości odciętych x_B , x_C , x_L można opisać wyrażeniami:

$$x_B = (R_3 - R_1) \operatorname{tg} \gamma \quad (4.60)$$

$$x_C = x_B + R_1 \sin \gamma \quad (4.61)$$

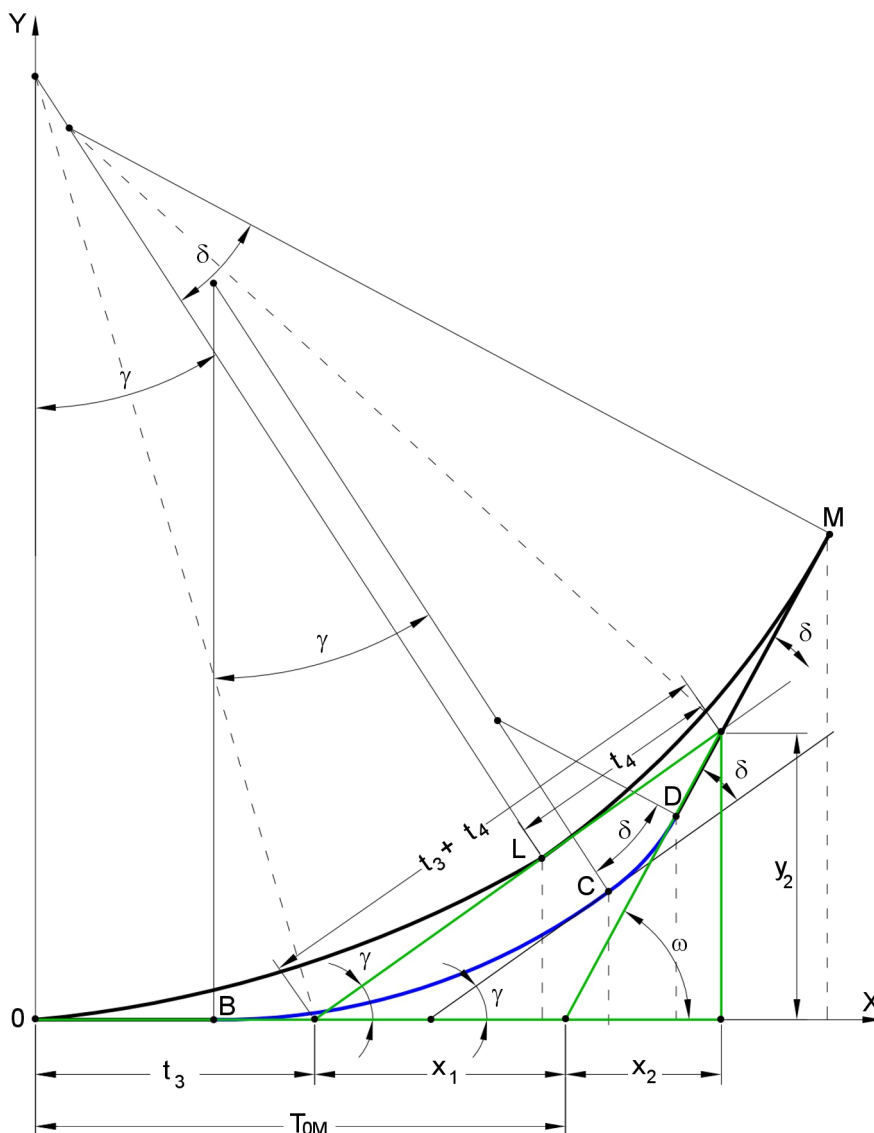
$$x_L = R_3 \sin \gamma \quad (4.62)$$

gdzie:

- R_3 promień pierwszego projektowanego łuku koszowego w m ,
- R_1 promień pierwszego istniejącego łuku koszowego w m .

Długość stycznnej projektowanego łuku koszowego określa zależność (rys. 4.37):

$$T_{0M} = t_3 + x_1 \quad (4.63)$$



Rys. 4.37. Schemat łuku koszowego: istniejącego (kolor granatowy) i projektowanego (kolor czarny) – wyznaczenie stycznych obu układów

gdzie:

- t_3 styczna pierwszego projektowanego łuku kołowego w m ,
- x_1 odległość od końca stycznej pierwszego projektowanego łuku do końca stycznej projektowanego łuku koszowego w m .

Wartość stycznej t_3 wyznacza się korzystając z zależności:

$$t_3 = R_3 \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \quad (4.64)$$

Natomiast wartość x_1 wynosi:

$$x_1 = \cos \gamma (t_3 + t_4) - x_2 \quad (4.65)$$

gdzie:

t_4 styczna drugiego projektowanego łuku kołowego w m ,
 x_2 odległość wyznaczona z równania:

$$x_2 = \frac{y_2}{\operatorname{tg} \omega} = \frac{\sin \gamma (t_3 + t_4)}{\operatorname{tg} \omega} \quad (4.66)$$

Wartość stycznej t_4 przedstawia zależność:

$$t_4 = R_4 \operatorname{tg} \frac{\omega - \gamma}{2} \quad (4.67)$$

gdzie:

R_4 promień drugiego projektowanego łuku kołowego w m .

Następnie można wyznaczyć odciętą punktu D , która opisana jest zależnością (4.58). Wartość odciętej x_M obliczana jest za pomocą zależności:

$$x_M = T_{0M} + t_4 \cos \omega + x_2 \quad (4.68)$$

Długość drugiej stycznej głównej nowego układu opisuje następująca zależność:

$$T_{0M_2} = \frac{t_4 \cos \omega + x_2}{\cos \omega} \quad (4.69)$$

Rozdział 5

Obliczenia robót ziemnych

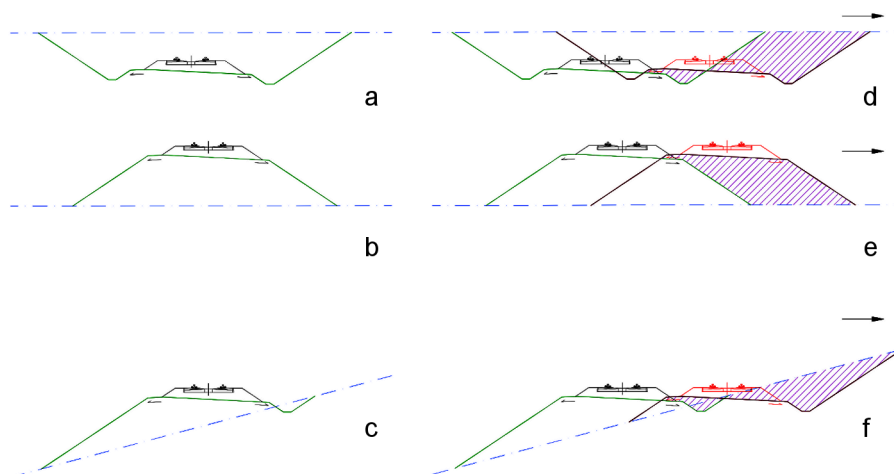
Opracowane metody obliczania odsunięć osi toru, dla różnych typów łuków istniejących i projektowanych, stanowiąc będą podstawę do obliczania zakresu robót ziemnych dla różnych przypadków ukształtowania poprzecznego i podłużnego terenu. Zagadnienie to nie jest nowe i zostało przedstawione w wielu opracowaniach dotyczących projektowania dróg kołowych. Ponadto, obliczenia zakresu robót ziemnych związanych z przesunięciem osi toru omówione są również w pracy [20]. Jednak przedstawiona w pracy metoda obliczeniowa obrazuje nieco inne podejście do zagadnienia wyznaczania objętości robót ziemnych i została opracowana z założoną dokładnością na potrzeby metody wielokryterialnej oceny. Jako że zakres robót ziemnych jest w tej metodzie jednym z kryteriów (w opracowanej funkcji celu), postanowiono przedstawić założenia i sposób jego wyznaczania.

5.1. Przyjęte założenia

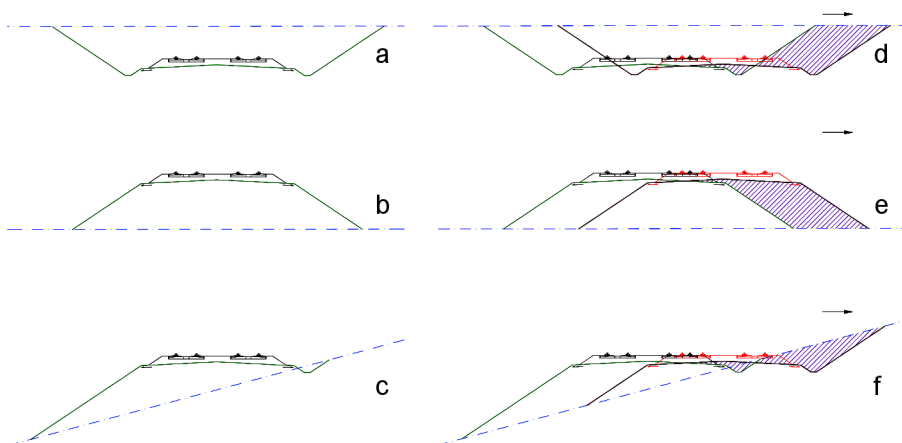
Wyznaczenie objętości robót ziemnych jest kolejnym etapem analizy wielokryterialnej. Obliczenia te wykonywane są dla trzech różnych przypadków, które mogą mieć miejsce przy modernizacji linii kolejowej jednotorowej (rys. 5.1) i dwutorowej (rys. 5.2). W zależności od pochylenia terenu w przekroju poprzecznym mogą wystąpić następujące sytuacje [116]:

- przekop (rys. 5.1a), przy czym jego głębokość nie przekracza 12 m,
- nasyp (rys. 5.1b), gdy jego wysokość nie przekracza 12 m,
- częściowo nasyp i przekop (rys. 5.1c).

Omawiany w pracy algorytm pozwala na obliczanie zakresu prac ziemnych dla dowolnie przyjętej długości toru. Wysokość nasypu lub głębokość przekopu podawana jest jako wartość średnia przypadająca na analizowany przedział. W obliczeniach uwzględniono konieczność zastosowania dodatkowych łąw w przypadkach, gdy wysokość nasypu (względnie głębokość przekopu) przekracza 6 m. Założono również stałe pochylenie skarpy wynoszące 1:1,5, niezależnie od technologii umacniania ich zbocza. W proponowanym podejściu do obliczeń mas ziemnych zastosowano algorytmy, które dobierane są w zależności od zakresu przesunięć osi toru. Przykładowo, jeżeli wartość przesunięcia nie przekracza wartości szerokości podstawy nasypu (korony przekopu), przyjmuje się, że pozostawiany jest istniejący nasyp (przekop), natomiast wynikiem obliczeń jest potrzebna ilość gruntu do rozbudowy nasypu lub do usunięcia z miejsca skarpy przekopu. W przypadku, gdy przesunięcie poprzeczne układu projektowanego względem istniejącego jest większe od wartości szerokości



Rys. 5.1. Przekroje poprzeczne linii jednotorowej w zależności od usytuowania toru względem poziomu terenu *a, b, c*, Przekroje poprzeczne linii jednotorowej w położeniu pierwotnym i nowoprojektowanym, pole zakreskowane prezentuje zakres robót ziemnych w przekroju *d, e, f*



Rys. 5.2. Przekroje poprzeczne linii dwutorowej w zależności od usytuowania toru względem poziomu terenu *a, b, c*, przekroje poprzeczne linii dwutorowej w położeniu pierwotnym i nowoprojektowanym, pole zakreskowane prezentuje zakres robót ziemnych w przekroju *d, e, f*

podstawy nasypu, objętość mas ziemnych będzie wyznaczana jak dla nowej budowlu ziemnej. Na rysunkach 5.1d ,e ,f oraz 5.2d ,e ,f przedstawiono obliczone pole (zakreskowanie) dla przypadku, kiedy nowe torowisko częściowo pokrywa stare.

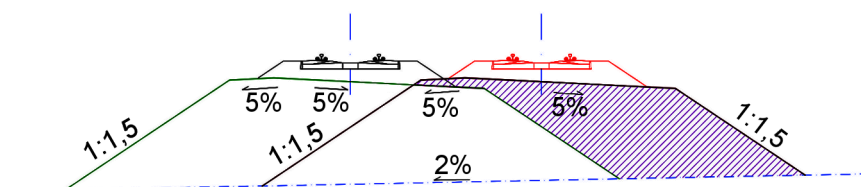
5.2. Obliczanie powierzchni przekroju poprzecznego nasypu

W rozdziale przedstawiono metodę obliczania robót ziemnych dla przypadku, w którym dany odcinek linii kolejowej znajduje się w całości na nasypie na linii jedno

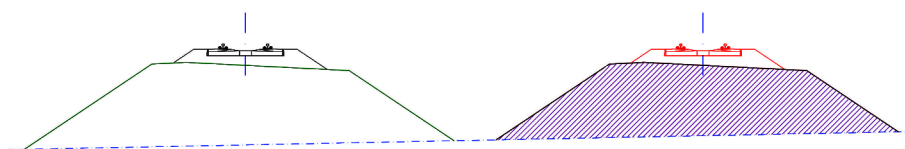
i dwutorowej. Do wyznaczenia zakresu robót ziemnych wykonano analizę, w której określano zależności występujące pomiędzy następującymi zmiennymi:

- przesunięciem osi toru,
- pochyleniem terenu,
- wysokością nasypu.

W pierwszej kolejności przyjęto, że występować mogą dwa różne przypadki obliczeniowe. Pierwszy obejmuje sytuacje, w których wartość przesunięcia osi toru jest mniejsza od szerokości podstawy nasypu. Wówczas zachodzi potrzeba dobudowania części nasypu pod projektowane położenie linii kolejowej (rys. 5.3). Natomiast w drugim przypadku odpowiedni zakres przesunięcia poprzecznego konstrukcji wymusza wyznaczenie objętości gruntu dla całego nasypu (rys. 5.4)



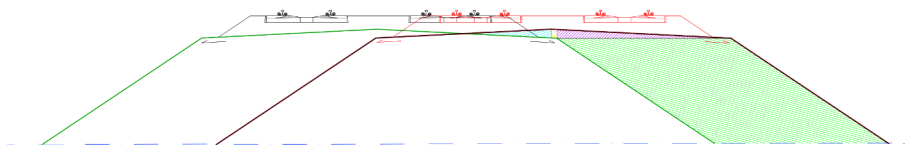
Rys. 5.3. Względne położenie nasypu istniejącego i nowoproyektowanego – 1 przypadek obliczeniowy. Zakreskowane pole wyznacza zakres rozbudowy.



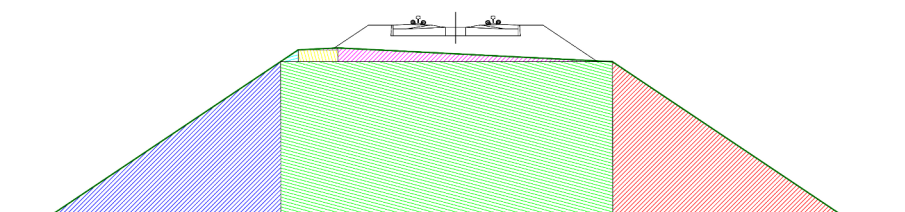
Rys. 5.4. Względne położenie nasypu istniejącego i nowoproyektowanego – 2 przypadek obliczeniowy. Zakreskowane pole wyznacza zakres rozbudowy.

Znając wartość przesunięcia układu można obliczyć objętość robót ziemnych. Dla pierwszego przypadku należy wyznaczyć pola powierzchni (rys. 5.3). Dla usprawnienia obliczeń postanowiono opracować wstępne algorytmy, które umożliwiłyby opisanie wartości pól w postaci funkcji zależnej od przesunięcia, wysokości nasypu i pochylenia terenu. Posłużono się arkuszem kalkulacyjnym i obliczono pola dla dowolnej wartości przesunięć mieszczących się w przedziale obejmującym wartości przesunięć do szerokości ławy torowiska (przyjęto wartość 6,6 m). Obliczenia wykonano dla różnych wysokości nasypu z krokiem 0,1 m. Odpowiednie pola przekrojów poprzecznych obliczone zostały również dla różnego pochylenia terenu w przedziale $\langle 0-6\% \rangle$.

Obliczenia wykonano dzieląc wszystkie analizowane obszary na proste figury geometryczne (rys. 5.5 i rys. 5.6). Procedura ta jest bardzo pracochłonna, ale gwarantuje założoną dokładność. Po zsumowaniu otrzymano pola powierzchni,

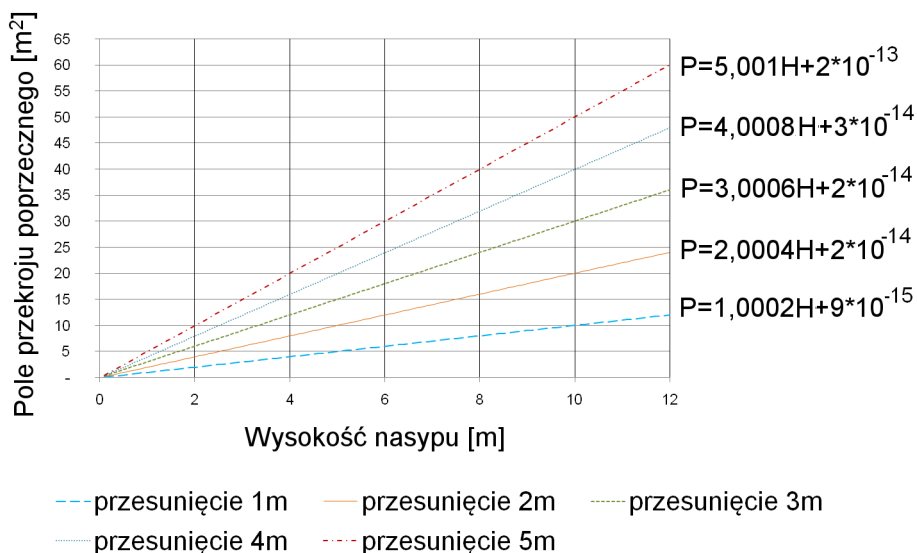


Rys. 5.5. Podział pola przekroju poprzecznego na proste figury geometryczne dla przykładowej linii dwutorowej w pierwszym przypadku obliczeniowym



Rys. 5.6. Podział pola przekroju poprzecznego na proste figury geometryczne dla przykładowej linii jednotorowej w drugim przypadku obliczeniowym

na których wykonane będą roboty ziemne. Wykonano wykresy zależności pola powierzchni od wysokości nasypu dla wszystkich przypadków pochyłości terenu. Na rysunku 5.7 przedstawiono omawianą zależność dla pochylenia 2% i przesunięć osi toru w zakresie od 1 do 5 m.



Rys. 5.7. Wykres zależności pola przekroju poprzecznego od wysokości nasypu dla podanych przesunięć osi toru

Jak widać na wykresie, wartość pola przekroju poprzecznego jest zależna od wysokości nasypu, jak również od przesunięcia układu. Na podstawie tej analizy,

poprzez zastosowanie regresji liniowej ustalono, że wartość pola przesunięcia ma charakter liniowy i wyrażona jest zależnością $y = a_N x + b_N$. Wartość b_N jest pomijalnie mała, natomiast współczynnik a_N jest w przybliżeniu równy przesunięciu układu projektowanego względem istniejącego. W analizie uwzględniono również pochylenie terenu w zakresie do 6%, a z przeprowadzonych obliczeń wynika, że wpływ tego parametru jest minimalny. Zastosowanie przyjętych uproszczeń ma znikomy wpływ na obliczaną powierzchnię. Wartość pola przekroju poprzecznego można więc opisać zależnością:

$$P_{N_{i_1}} = w \cdot H \quad (5.1)$$

gdzie:

- $P_{N_{i_1}}$ pole przekroju poprzecznego nasypu na linii jednotorowej dla pierwszego przypadku obliczeniowego w m^2 ,
 H wysokość istniejącego nasypu (lub głębokość przekopu) w m ,
 w wartość przesunięcia układu projektowanego względem istniejącego w m .

W podobny sposób obliczono pola dla przypadku, gdy przesunięcie w mieści się w przedziale $(6, 6; 3H + 6, 6)$. W obliczeniach nie uwzględniono spadku poprzecznego terenu (uproszczenie to przyjęto do spadku 6%; dla spadków poprzecznych powyżej tej wartości wykonano odrębne obliczenia, które zostaną przedstawione w dalszej części tej pracy). Wykazano, że wartość pola przekroju poprzecznego można przedstawić w postaci funkcji liniowej zależnej od wysokości nasypu i wartości przesunięcia. Wartość pola przekroju poprzecznego opisuje następująca zależność:

$$P_{N_{i_2}} = a_{N_{ij}} H + b_{N_{ij}} \quad (5.2)$$

gdzie:

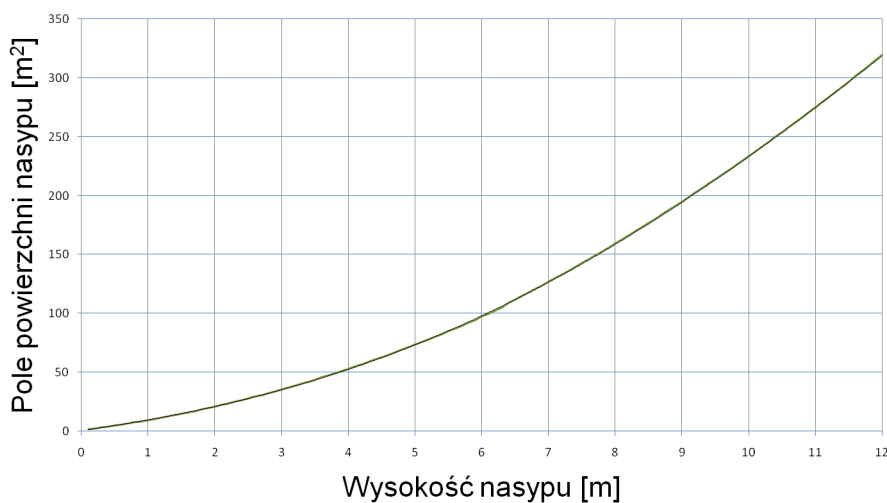
- $P_{N_{i_2}}$ pole przekroju poprzecznego nasypu na linii jednotorowej dla drugiego przypadku obliczeniowego w m^2 ,
 $a_{N_{ij}}$ współczynnik kierunkowy prostej regresji
 $a_{N_{ij}} = w + 0,4$,
 $b_{N_{ij}}$ współczynnik prostej regresji
 $b_{N_{ij}} = 0,17w^2 + 2,2w - 6,19$.

Analogicznie zostały wykonane obliczenia obszaru dla nowego nasypu (drugi przypadek obliczeniowy – rys. 5.4). Podobnie obliczono pole wieloboku (pole nasypu w przekroju poprzecznym), stosując sumowanie pól prostych figur geometrycznych. Obliczano pole nasypu o różnej wysokości z dokładnością 0,1 m i nachyleniami w przedziale $<0-6\%>$. Wyniki dla przypadku nasypów o pochyleniu terenu 2% przedstawiono w formie wykresu (rys. 5.8). Wykres ten opisuje zależność pomiędzy polem przekroju poprzecznego nasypu a jego wysokością. Wykorzystując regresję nieliniową ustalono, że omawiana zależność dla nachylenia terenu 2% może zostać opisana wielomianem 4-tego stopnia:

$$P_{N_{i_3}} = -0,0059H^4 + 0,1396H^3 + 0,6752H^2 + 8,4745H + 0,5153 \quad (5.3)$$

gdzie:

$P_{N_{ij_3}}$ pole przekroju poprzecznego nasypu na przykładowej linii jednotorowej dla trzeciego przypadku obliczeniowego w m^2 .



$$P = -0,0059H^4 + 0,1396H^3 + 0,6752H^2 + 8,4745H + 0,5153$$

Rys. 5.8. Wykres zależności pola przekroju poprzecznego nasypu od jego wysokości dla nachylenia terenu 2%

W tabeli 5.1 przedstawiono równania dla różnych wartości pochylenia terenu.

Pochylenie [%]	Pole przekroju poprzecznego [m^2]
0%	$P = 1,6563H^2 + 6,1217H + 1,8389$
1%	$P = 1,6561H^2 + 6,1085H + 1,8397$
2%	$P = -0,0059H^4 + 0,1397H^3 + 0,6755H^2 + 8,4762H + 0,5153$
3%	$P = -0,006H^4 + 0,1417H^3 + 0,676H^2 + 8,4536H + 0,5506$
4%	$P = -0,0063H^4 + 0,1479H^3 + 0,6482H^2 + 8,4962H + 0,5739$
5%	$P = -0,0068H^4 + 0,1554H^3 + 0,6293H^2 + 8,4846H + 0,6468$
6%	$P = -0,0068H^4 + 0,1562H^3 + 0,6332H^2 + 8,4776H + 0,672$

Tab. 5.1. Równania pola przekroju poprzecznego w zależności od nachylenia terenu

Pole przekroju poprzecznego dla linii jednotorowej usytuowanej w całości na nasypie o wysokości do 6 m, bez uwzględniania spadku poprzecznego terenu, wynosi:

$$P_{N_{ij}} = \begin{cases} w \cdot H & \text{dla } w < 6,6 \\ a_{N_{ij}}H + b_{N_{ij}} & \text{dla } 6,6 \leq w < 6,6 + 3H \\ 1,636H^2 + 6,1217H + 1,8389 & \text{dla } w \geq 6,6 + 3H \end{cases} \quad (5.4)$$

gdzie:

$P_{N_{ij}}$ pole przekroju poprzecznego nasypu na przykładowej linii jednotorowej w m^2 .

W oparciu o zastosowaną metodę obliczeń, dla przypadku linii jednotorowej usytuowanej w całości w nasypie, obliczono również pola przekroju poprzecznego dla linii dwutorowej. Zakładając, że spadek poprzeczny terenu jest pomijalnie mały, można zapisać:

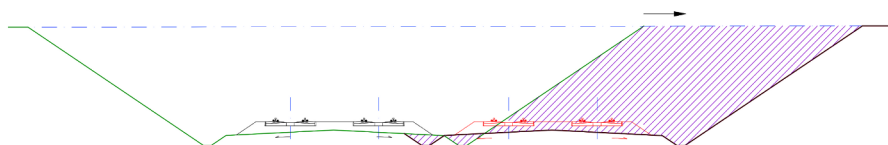
$$P_{N_{ld}} = \begin{cases} w \cdot H & \text{dla } w < 11,5 \\ a_{N_{ld}} H + b_{N_{ld}} & \text{dla } 11,5 \leq w < 11,5 + 3H \\ 1,5H^2 + 11,5H + 1,6531 & \text{dla } w \geq 11,5 + 3H \end{cases} \quad (5.5)$$

gdzie:

- $P_{N_{ld}}$ pole przekroju poprzecznego nasypu na przykładowej linii dwutorowej w m^2 ;
- $a_{N_{ld}}$ współczynnik kierunkowy prostej regresji
 $a_{N_{ld}} = -0,0017w^3 + 0,052w^2 + 0,49w + 15562$;
- $b_{N_{ld}}$ współczynnik prostej regresji
 $b_{N_{ld}} = 0,0298w^3 - 1,5798w^2 + 26,864w - 148,14$.

5.3. Obliczanie powierzchni przekroju poprzecznego przekopu

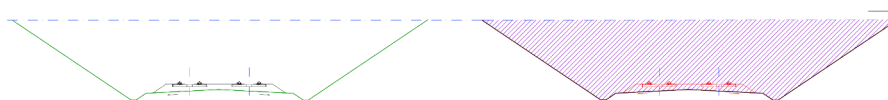
W rozdziale tym omówione zostaną obliczenia robót ziemnych dla przypadku, w którym linia kolejowa w przekroju poprzecznym usytuowana jest w przekopie (dla przyjętej linii jedno i dwutorowej). Podobnie jak w przypadku obliczeń robót ziemnych, gdy linia usytuowana jest w nasypie, wykonano obliczenia dla dwóch przypadków. W pierwszym omawianym przypadku odsunięcie osi toru wymaga wykonania poszerzenia istniejącego przekopu poprzez usunięcie odpowiedniej ilości mas ziemnych (rys. 5.9). W drugim przypadku obliczeniowym wartość przesunięcia wymusza obliczenie zakresu robót ziemnych dla całego przekopu (rys. 5.10) [116, 118].



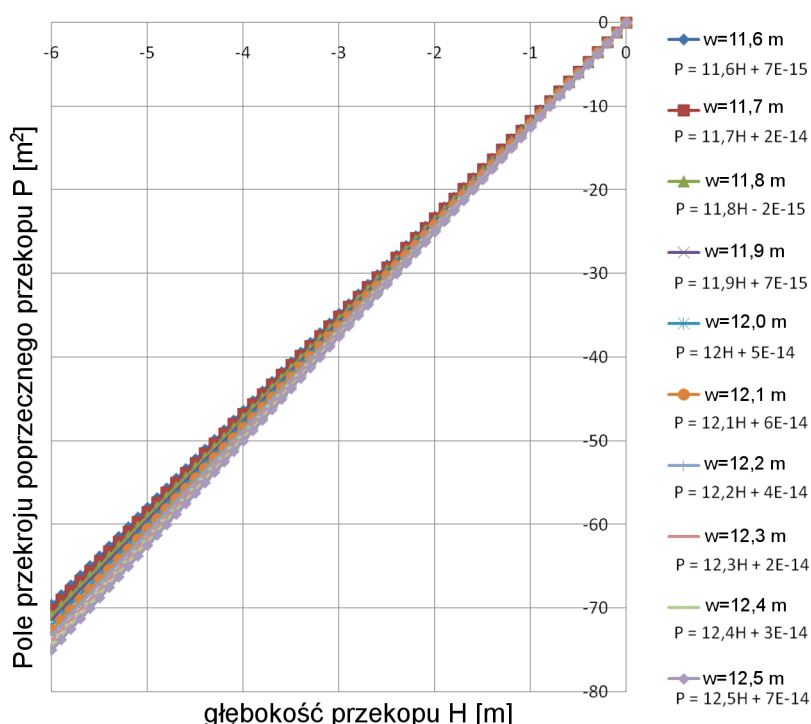
Rys. 5.9. Względne położenie przekopu istniejącego i nowoprojektowanego – 1 przykład obliczeniowy. Zakreskowane pole wyznacza zakres rozbudowy.

Pierwszy przypadek obliczeniowy wymagał opracowania wstępnych algorytmów. Szukano zależności występującej pomiędzy polem powierzchni przekroju poprzecznego a wartościami odsunięć osi toru i głębokością przekopu. Analizy były przeprowadzone zarówno dla linii jedno, jak i dwutorowej. Pochylenie poprzeczne terenu w zakresie 0-5% zostało pominięte z uwagi na niewielki wpływ tego parametru na wartość pola powierzchni przekroju poprzecznego. Analogicznie do obliczania zakresu robót ziemnych nasypów, wykonano dokładną analizę dla obu przypadków. Pole powierzchni przekroju poprzecznego wyznaczono jako sumę pól prostych figur geometrycznych. Wszystkie obliczenia wykonano z dokładnością do 0,1 m. W praktyce oznaczało to wyznaczenie pól dla każdej głębokości przekopu

w zakresie od 0 do -6 m i dla każdego przesunięcia co 0,1 m. Opracowanie algorytmu było zatem równie pracochłonne jak w przypadku nasypów. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wyznaczono zależności między polem przekroju poprzecznego przekopu a jego głębokością i przesunięciem osi toru (rys. 5.11).



Rys. 5.10. Względne położenie przekopu istniejącego i nowoprojektowanego - 2 przypadek obliczeniowy. Zakreskowane pole wyznacza zakres rozbudowy.



Rys. 5.11. Zależność pola powierzchni przekroju poprzecznego przekopu na linii dwutorowej od jego głębokości dla przesunięć w w zakresie 11,6–12,5 m

Następnie wyznaczono pola powierzchni dla drugiego przypadku obliczeniowego. Ponownie zsumowano pola figur będących składowymi pola powierzchni przekroju poprzecznego całego nowobudowanego przekopu. Wartość pola powierzchni w tym przypadku została wyznaczona za pomocą regresji nieliniowej. Ta sama procedura obliczeniowa została wykonana dla przypadku linii jedno i dwutorowej (rys. 5.12).

Rezultatem przeprowadzonych kalkulacji są opracowane wyrażenia określające wartość pola przekroju poprzecznego dla linii jednotorowej. Wartości tych funkcji

zależą od odsunięcia osi toru projektowanego względem istniejącego i głębokości przekopu:

$$P_{P_{lj}} = \begin{cases} w \cdot H & \text{dla } w < 8,95 \\ a_{P_{lj}} H + b_{P_{lj}} & \text{dla } 8,95 \leq w < 11,2 - 3H \\ -0,0002H^2 - 0,0274H + 0,4459 & \text{dla } w \geq 11,5 + 3H \end{cases} \quad (5.6)$$

gdzie:

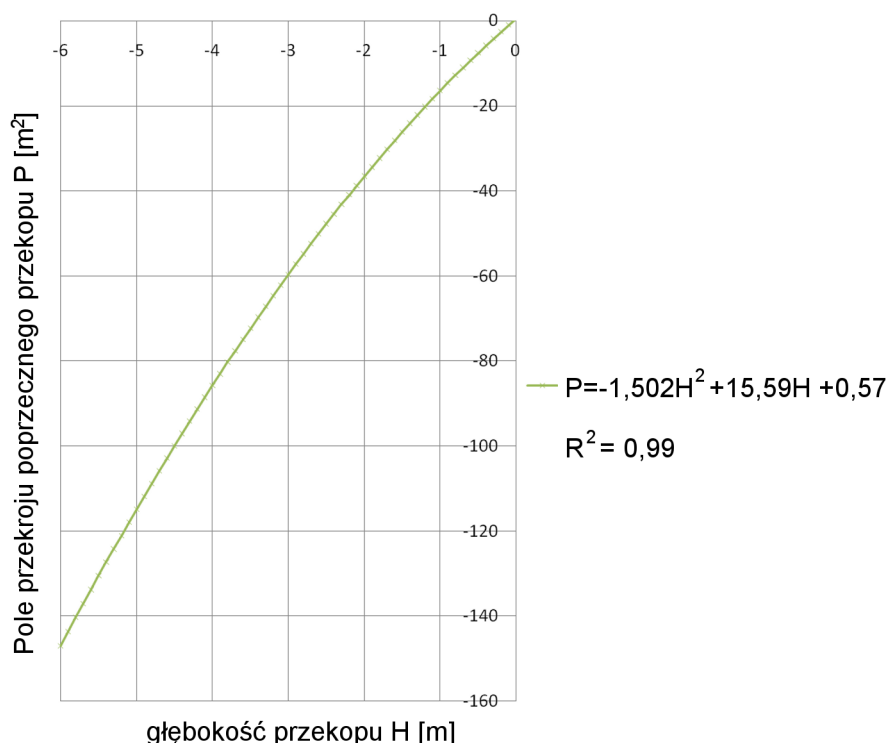
$$\begin{aligned} P_{P_{lj}} & \text{ pole przekroju poprzecznego przekopu dla przyjętej linii jednotorowej} \\ & \text{w } m^2, \\ a_{P_{lj}} & \text{ współczynnik kierunkowy prostej regresji} \\ & a_{P_{lj}} = w, \\ b_{P_{lj}} & \text{ współczynnik prostej regresji} \\ & b_{P_{lj}} = \frac{(-w+3H+9,8238)(-\frac{w}{3}+H+3,2746)}{2}. \end{aligned}$$

W oparciu o zastosowaną metodę obliczeń dla przypadku linii jednotorowej usytuowanej w całości w przekopie obliczono również pola przekroju poprzecznego dla linii dwutorowej.

$$P_{P_{ld}} = \begin{cases} w \cdot H & \text{dla } w < 13,8 \\ a_{P_{ld}} H + b_{P_{ld}} & \text{dla } 13,8 \leq w < 16,6 - 3H \\ -1,5021H^2 + 15,585H + 0,5893 & \text{dla } w \geq 16,6 - 3H \end{cases} \quad (5.7)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} P_{P_{ld}} & \text{ pole przekroju poprzecznego przekopu dla przyjętej linii dwutorowej} \\ & \text{w } m^2, \\ a_{P_{ld}} & \text{ współczynnik kierunkowy prostej regresji} \\ & a_{P_{ld}} = w \text{ w } m, \\ b_{P_{ld}} & \text{ współczynnik prostej regresji} \\ & b_{P_{ld}} = \frac{(-w+3H+15,3)(-\frac{w}{3}+H+5,1)}{2} \text{ w } m^2. \end{aligned}$$

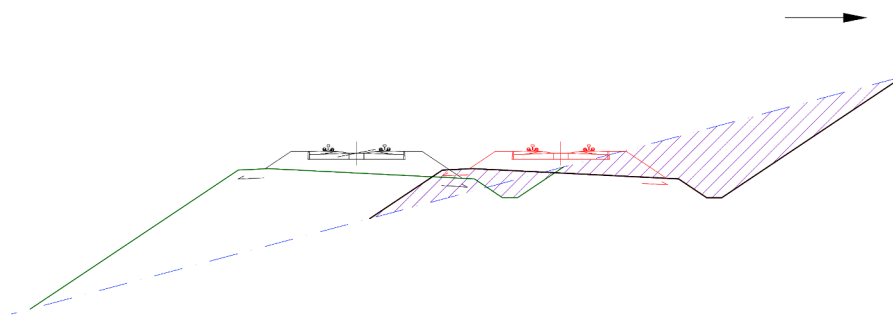


Rys. 5.12. Wykres zależności pola powierzchni przekroju poprzecznego przekopu od jego głębokości dla linii dwutorowej – 2 przypadek obliczeniowy

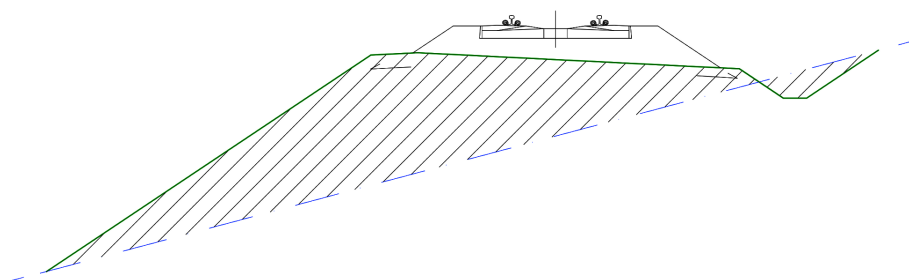
5.4. Obliczanie pola przekroju poprzecznego na zboczu terenowym

Tematem tego rozdziału są obliczenia pól przekroju poprzecznego dla linii kolejowej usytuowanej na zboczu terenowym. Obliczenia zostały wykonane kolejno dla pochyłości 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 40%, 45% dla linii jedno i dwutorowej. Dla tych przypadków zostały obliczone pola przekroju poprzecznego dla wysokości nasypu (głębokości przekopu) w zakresie od -6 m do 6 m. Następnie analizowano zależności występujące pomiędzy pochyleniem terenu i wysokością nasypu. W późniejszej fazie obliczeń uwzględnione zostały również przesunięcia osi toru projektowanego względem istniejącego. Podobnie jak dla przypadku obliczeń pól dla odcinków linii usytuowanych w całości w nasypie bądź przekopie założono, że mogą wystąpić dwa przypadki obliczeniowe (rys. 5.13, rys. 5.14), a wysokość niwelety w wyniku przesunięcia nie ulega zmianie. Obliczenie pól przekroju poprzecznego dla omawianego rozwiązania wymagało przeanalizowania znacznej liczby przypadków i było pracochłonne. Każdy przekrój został podzielony na proste figury geometryczne, a pola ich zostały zsumowane. Zaobserwowano, że wartości pola powierzchni przekroju poprzecznego można zapisać w postaci funkcji liniowej zależnej od wartości pochylenia i wyrażonej w procentach.

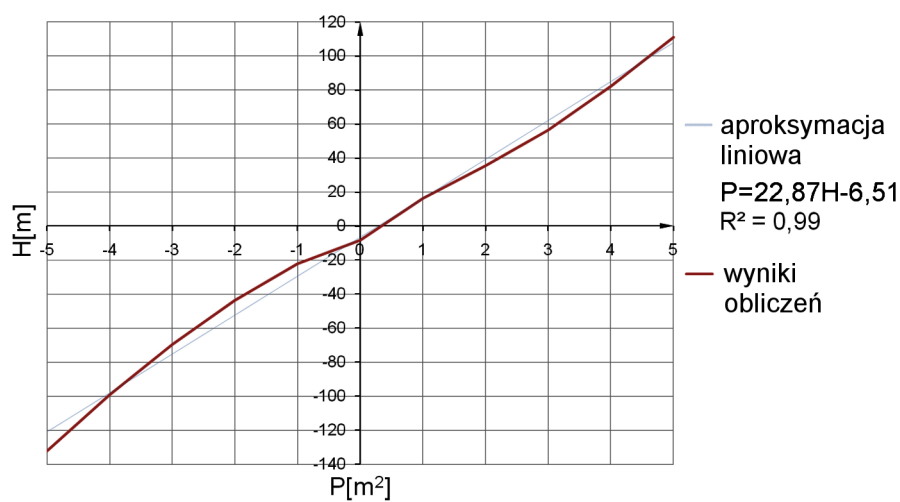
Przykładowe wyniki obliczeń dla pochylenia poprzecznego terenu o wartości 20% na linii dwutorowej zostały przedstawione na rysunku 5.15.



Rys. 5.13. Względne położenie nasypu/przekopu istniejącego i nowoprojektowanego usytuowanego na zboczu terenowym – 1 przypadek obliczeniowy. Zakreskowane pole wyznacza zakres rozbudowy.



Rys. 5.14. Położenie nowoprojektowanego nasypu usytuowanego na zboczu terenowym – 2 przypadek obliczeniowy. Zakreskowane pole wyznacza zakres rozbudowy.



Rys. 5.15. Wykres zależności pola przekroju poprzecznego nasypu (przekopu) od jego wysokości dla pochylenia 20%

Dla linii jednorodowej znajdującej się na zboczu terenowym wartość pola przekroju poprzecznego można wyznaczyć z zależności:

$$P_{Zt_{lj}} = a_{Zt_{lj}}H + b_{Zt_{lj}} \quad (5.8)$$

gdzie:

- $P_{Zt_{lj}}$ pole przekroju poprzecznego nasypu/przekopu na przykładowej linii jednorodowej w m^2 ,
 $a_{Zt_{lj}}$ współczynnik kierunkowy prostej regresji, zależny od wartości pochylenia poprzecznego terenu
 $a_{Zt_{lj}} = 221,02i^2 - 64,718i + 20,368$,
 $b_{Zt_{lj}}$ współczynnik kierunkowy prostej regresji, zależny od wartości pochylenia poprzecznego terenu
 $b_{Zt_{lj}} = -116,66i^2 + 34,227i - 6,8091$,
 i pochylenie poprzeczne terenu w %.

Dla linii dwutorowej znajdującej się na zboczu terenowym pola przekroju poprzecznego nasypu (przekopu) opisuje następujące równanie:

$$P_{Zt_{ld}} = a_{Zt_{ld}}H + b_{Zt_{ld}} \quad (5.9)$$

gdzie:

- $P_{Zt_{ld}}$ pole przekroju poprzecznego nasypu/przekopu na przykładowej linii dwutorowej w m^2 ,
 $a_{Zt_{ld}}$ współczynnik zależny od pochylenia poprzecznego terenu
 $a_{Zt_{ld}} = 322,06i^2 - 94,952i + 27,792[m]$,
 $b_{Zt_{ld}}$ współczynnik zależny od pochylenia poprzecznego terenu
 $b_{Zt_{ld}} = -192,56i^2 + 57,066i - 9,49[m^2]$.

Przy stałym pochyleniu poprzecznym przesunięcie osi toru bez zmiany wysokości niwelety powoduje zmianę wysokości nasypu (przekopu). Obliczenie pola przekroju poprzecznego w opisanym przypadku nie ulegnie zmianie. Zakłada się jednak, że w zależności od wartości odsunięcia zmieni się sama wysokość przyjęta w obliczeniach. Dla linii jednorodowej wysokość można opisać zależnością:

$$H_{wi_{lj}} = H + H'_{lj} = H - wi - 0,1663 \quad (5.10)$$

gdzie:

- $H_{wi_{lj}}$ wysokość nasypu (głębokość przekopu) na linii jednorodowej w zależności od wartości przesunięcia w m .

Dla linii dwutorowej wysokość można opisać zależnością:

$$H_{wi_{ld}} = H + H'_{ld} = H - wi - 0,2875 \quad (5.11)$$

gdzie:

- $H_{wi_{ld}}$ wysokość nasypu (głębokość przekopu) na linii dwutorowej w zależności od wartości przesunięcia w m .

Wyznaczenie pola powierzchni przekroju poprzecznego dla linii jedno i dwutorowej będzie zatem wymagało podstawienia do równań (5.8) i (5.9) parametrów wysokości – odpowiednio $H_{wi_{lj}}$ i $H_{wi_{ld}}$.

5.5. Obliczenie objętości robót ziemnych

Głównym celem obliczania pól powierzchni przekroju poprzecznego w opisywanych przypadkach jest wyznaczenie objętości robót ziemnych. Jeżeli rozpatrywany fragment toru w łuku zostanie podzielony na mniejsze odcinki (krok obliczeniowy), to można założyć, że objętość robót każdego z nich można wyznaczyć jako objętość graniastosłupa. Wartość tę można opisać równaniem:

$$Obj_g = P_{pg} \cdot H_g \quad (5.12)$$

gdzie:

- Obj_g objętość graniastosłupa w m^3 ,
- P_{pg} pole podstawy graniastosłupa w m^2 ,
- H_g wysokość graniastosłupa w m .

W omawianym przypadku pole podstawy zostało zdefiniowane jako pole przekroju poprzecznego nasypu/przekopu, wysokość natomiast jest długością rozpatrywanego odcinka. Zatem objętość robót ziemnych, potrzebna do wykonania prac modernizacyjnych na rozpatrywanym łuku, wyznaczona jest jako suma objętości z wszystkich odcinków:

$$RZ = \sum P \cdot \Delta l_{odc} \quad (5.13)$$

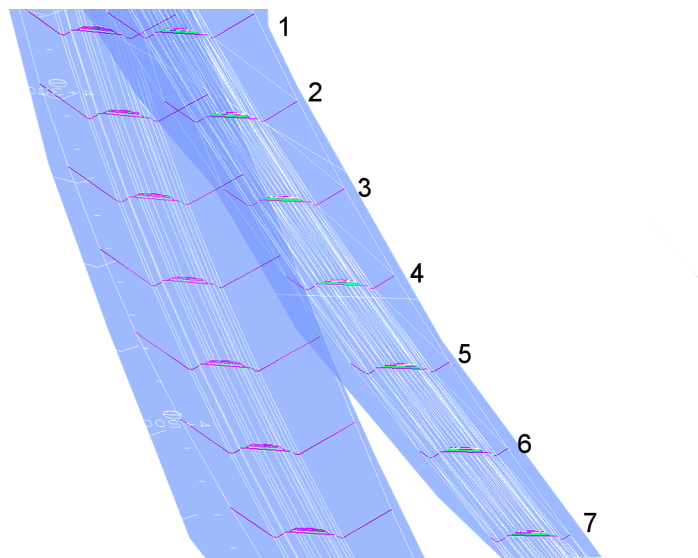
gdzie:

- RZ objętość robót ziemnych w m^3 ;
- P pole powierzchni przekroju poprzecznego nasypu/przekopu w m^2 ;
- Δl_{odc} długość rozpatrywanych odcinków (krok obliczeniowy) w m .

Ponieważ podstawy omawianych graniastosłupów różnią się, w obliczeniach została przyjęta wartość mniej korzystna. Przy niewielkich długościach kroku obliczeniowego błąd wynikający z tak przyjętego założenia ma niewielkie znaczenie w tego typu analizie. Obliczanie objętości według tej metody umożliwia uwzględnienie różnych sytuacji występujących w terenie. Każda wartość pola powierzchni przekroju została celowo powiązana z wartością odsunięcia, co zwiększa w tym wypadku dokładność wykonywanych obliczeń. Podejście to umożliwia wyznaczenie robót ziemnych w przypadku zmiennego pochylenia terenu zarówno w profilu podłużnym jak i poprzecznym. Uwzględnione są zatem przekopy oraz nasypy w nawiązaniu do układu istniejącego. Przykładowa sytuacja terenowa została przedstawiona na rysunku 5.16. Podobnie jak w opisywanej metodzie obliczeń, na przedstawionym fragmencie łuku dokonano podziału na odcinki. Na przykładzie tym wyraźnie widać, że na rozpatrywanej długości układu mogą wystąpić różne warianty obliczeniowe. Pola przekroju poprzecznego oznaczonego numerami 1 i 2 wyznaczone będą jako pola przekroju przekopu o odsunięciu osi w zakresie dla $8,95 \leq w < 11,2 - 3H$. Pola przekroju poprzecznego 3,4,5 będą wyznaczone dla przypadku, w którym należy wykonać nowy przekop. Natomiast pola przekrojów 6 i 7 będą wyznaczone jak dla zbocza terenowego.

Dlatego też każdy rozpatrywany przypadek wymaga indywidualnego podejścia, a metoda umożliwia obliczenie objętości z podziałem na odcinki. Długość kroku obliczeniowego zależy od przyjętej dokładności. Im mniejszy odcinek obliczeniowy, tym więcej różnych przypadków terenowych będzie uwzględnionych. Trzeba mieć

jednak na uwadze fakt, że duża dokładność obliczeń, która dla rozpatrywanych pojedynczych przypadków jest atutem, przy rozpatrywaniu 1000 i więcej układów spowalnia proces obliczeniowy. Należy więc dobrać krok tak, aby zapewnił wystarczającą dokładność i nie wpłynął na wydłużenie czasu oczekiwania na rozwiązanie. Próby obliczeniowe wykazały, że dokładność rzędu 1 m jest do przyjęcia, z punktu widzenia dokładności i czasu obliczeń.



Rys. 5.16. Przekroje poprzeczne istniejącego i projektowanego układu geometrycznego na fragmencie rozpatrywanego odcinka trasy (z przyjętym krokiem obliczeniowym)

Rozdział 6

Budowa modelu GA

W opracowanej metodzie optymalizacji wielokryterialnej wykorzystano algorytmy genetyczne. Nie posłużono się w tym przypadku gotowymi bibliotekami rozwiązań, lecz skonstruowano algorytm dopasowany do potrzeb omawianego zagadnienia. Na samym początku został opracowany model, na podstawie którego przeprowadzono optymalizację. Ogólne zasady budowy algorytmu zostaną zachowane. Jednak (jak zauważa Trojanowski [122]) wiele kwestii dotyczących ogólnego schematu działania algorytmu jest otwartych. Dzięki temu można różnie interpretować zawartość osobników i ich selekcję. Dziedziczenie cech i działanie operatorów genetycznych pozostawia również pewną dowolność. Te cechy algorytmu umożliwiają dopasowywanie każdego kroku działania do indywidualnych potrzeb.

Przy tworzeniu modelu należy więc ustalić budowę i działanie poszczególnych elementów GA:

- cechy osobników, ich ilość oraz struktura populacji,
- metoda generowania i selekcji osobników,
- działanie operatorów genetycznych,
- metoda oceny i dziedziczenia,
- sposób zakończenia obliczeń.

6.1. Generowanie populacji

Jak już wspomniano w rozdziale 2.3, pierwszym etapem w algorytmie genetycznym jest wygenerowanie skończonej liczby osobników (w tym przypadku układów geometrycznych). Składają się one z dwóch indywidualnych cech:

- promienia łuku projektowanego R_M [m],
- długości krzywych przejściowych L_M [m].

Założono, że w omawianym przypadku układ projektowany będzie łukiem kołowym z krzywymi przejściowymi o tej samej długości. Generowanie osobników następuje na drodze losowania. Wartości promienia i długości krzywych są ograniczone przyjętymi wartościami maksymalnymi i minimalnymi. Pomimo tego, wylosowane układy mogą nie być zgodne z ogólnymi zasadami projektowania i nie będą miały zastosowania dla przyjętych danych. Dlatego też, inaczej niż w klasycznym podejściu do GA, każdy wygenerowany osobnik podlega natychmiastowej weryfikacji. Niespełnienie choćby jednego z przyjętych warunków eliminuje osobnika z dalszej analizy. Na tym etapie potrzebne są podstawowe informacje dotyczące układu projektowanego i istniejącego:

- kąt zwrotu trasy ω ,

- zakładana prędkość maksymalna V_{max} ,
- uśredniona prędkość najwolniejszych, kursujących regularnie pojazdów kolejowych V_t ,
- przyspieszenie odśrodkowe a_{dop} ,
- przyspieszenie dośrodkowe a_t

Weryfikacja polega na sprawdzeniu warunków na:

- minimalną długość krzywej przejściowej z uwagi na przyrost przyspieszenia niezerównoważonego L_{min}^{ψ} ;
- minimalną długość krzywej przejściowej z uwagi na prędkość podnoszenia się koła na rampie przechyłkowej L_{min}^f ;
- minimalną długość krzywej przejściowej z uwagi na dokładność tyczenia L_{min}^n ;
- minimalną długość części kołowej łuku k dla zakresu obliczonych przechyłek $\langle h_{min}; h_{max} \rangle$.

W ten sposób uzyskujemy populację początkową, w której wszystkie osobniki (układy geometryczne) spełniają stawiane im założenia. Oprócz wymagań związanych z długością krzywej przejściowej i długością części kołowej łuku, wymóg przejazdu z zakładaną prędkością maksymalną jest również spełniony. Na tym etapie osobnik jest przedstawiony w jawnej postaci promienia i długości krzywych przejściowych pomniejszonych o ich wartości minimalne (rozdział 2.3). Istnieje pewne niewielkie prawdopodobieństwo, że przy małej wielkości populacji początkowej nie uda się wylosować ani jednego poprawnego osobnika. W takim przypadku losowanie należy powtórzyć. Jednak, jak wynika z wielu przeprowadzonych analiz, wygenerowanie populacji poprzez wylosowanie 1000 przypadkowych osobników zmniejszyło liczbę populacji osobników właściwych do około 500-700. Była to liczba wystarczająca na potrzeby rozpatrywanego przypadku.

6.2. Reprodukacja

Wygenerowane osobniki tworzą zbiór rozwiązań możliwych do zastosowania. Ponieważ każdy z układów mógłby zostać w tym przypadku zastosowany, należy ocenić, który z nich jest lepszy. W odniesieniu do środowiska naturalnego, największe prawo do potomstwa będą mieć osobniki najbardziej przystosowane [122]. Należy więc na tym etapie określić, w jaki sposób będzie wykonywana selekcja osobników i którym z nich należy dać prawo do przekazania swoich genów. Założono, że do następnej populacji zostanie przekazana konkretna liczba najlepszych osobników. Wszystkie osobniki w populacji – niezależnie od ich liczebności – podlegają ocenie, a następnie nadawane są im rangi w zależności od wartości funkcji dostosowania. W tym celu wszystkie chromosomy sortowane są od najlepszego do najgorszego (od wartości funkcji największej do najmniejszej – funkcja celu z założenia ma być maksymalizowana) i opisywane numerem pozycji w szeregu – rangą. Aby jednak przyznać rangę każdemu z osobników, należy wykonać najbardziej pracochłonny etap obliczeń – wyznaczenie funkcji celu FF . Jak już wspomniano w rozdziale 2.3, wartość tej funkcji zależy od trzech głównych kryteriów i opisana jest równaniem (2.11). Do wykonania obliczeń potrzebne są kolejne dane:

- promień istniejący R ,

- długość krzywej przejściowej istniejącej L_i ,
- przyjęty krok obliczeniowy (podział układu na odcinki),
- wysokość nasypu (głębokość przekopu) na początku istniejącej krzywej przejściowej H ,
- pochylenie poprzeczne i ,
- pochylenie podłużne i_{pod} .

Każdy parametr funkcji FF jest następnie wyznaczany oddzielnie dla każdego osobnika. Wyznaczany jest również koszt cyklu życia LCC_{szyn} dla każdego z układów. Następnie wyznaczane są wartości objętości robót ziemnych RZ dla przyjętego profilu podłużnego i poprzecznego, dla wszystkich występujących w konkretnym rozwiązaniu przypadków (nasyp/przekop/zbocze terenowe). Obliczenia te są wykonywane z przyjętą dokładnością (krokiem obliczeniowym). Ostatnim kryterium funkcji celu jest prędkość V_{max} , jaką można osiągnąć na danym układzie. Z założenia wszystkie chromosomy spełniają kryterium zakładanej prędkości, należy jednak odpowiednio "nagrodzić" wszystkie te osobniki, w przypadku których osiągnięcie prędkości wyższej od zakładanej jest możliwe. Każdy z osobników na etapie generowania rozwiązań miał wyznaczony zakres przechyłek, a nadawanie konkretnej wartości przechyłki zostało pozostawione do decyzji projektanta. Przeprowadzono próby, w których jednym z genów chromosomu była przechyłka. Analizy wykazały jednak, że tak skonstruowany algorytm miał bardzo małą szansę na wyjście poza pewne optima lokalne. Ponieważ dobór przechyłki nie nastręcza większych problemów, został on pominięty na tym etapie obliczeń. Zatem obliczenie maksymalnej prędkości musi zostać wykonane przy niewiadomej wartości przechyłki. Maksymalną prędkość na łuku z uwagi na jego promień można wyznaczyć dla maksymalnej wartości przechyłki, tj. 150 mm [1], odpowiednio przekształcając wyrażenie (1.24):

$$V_{max}^R = 3,6 \cdot \sqrt{R \cdot \left(a_{dop} + g \cdot \frac{h}{s} \right)} = 3,6 \cdot \sqrt{R \cdot \left(a_{dop} + g \cdot \frac{150}{s} \right)} \quad (6.1)$$

Dla przypadku ruchu mieszanego maksymalną prędkość z uwagi na promień należy wyznaczyć uwzględniając zarówno przyspieszenie odśrodkowe, jak i dośrodkowe. Dla takiego przypadku wartość maksymalnej prędkości opisana została zależnością [16]:

$$V_{max}^R = V_1 = \sqrt{V_t^2 + 12,96R(a_{dop} + a_t)} \quad (6.2)$$

Obliczając maksymalną prędkość należy rozpatrywać łuk całościowo uwzględniając również krzywe przejściowe. Należy zatem sprawdzić, czy prędkość nie jest ograniczona poprzez niedostateczną długość krzywych przejściowych. W tym celu należy sprawdzić, czy zachowane są dopuszczalne wartości prędkości podnoszenia się koła po rampie przechyłkowej i przyrostu przyspieszenia na krzywej przejściowej. Wartość prędkości z uwagi na przyrost przyspieszenia obliczana jest według zależności (1.25). W zależności tej zostaną podstawione wartości dopuszczalne określone przepisami [7]:

$$V_0^{l,\psi} = V_2 = 3,6 \frac{\psi_{dop}}{a_{dop}} L_M, \quad (6.3)$$

Natomiast prędkości maksymalna z uwagi na prędkość podnoszenia się koła na rampie przechyłkowej opisywana jest równaniem (1.26).

$$V_0^{l,f} = V_3 = 3,6 \frac{f_{dop}}{h_{max}} L_M, \quad (6.4)$$

Prędkość maksymalna będzie wartością najmniejszą z trzech opisanych wyrażeń:

$$V_{max} = \inf(V_1; V_2; V_3) \quad (6.5)$$

Założono zaokrąglenie wartości maksymalnej prędkości w dół do najbliższych dziesiątek km/h.

Po wyznaczeniu wartości poszczególnych parametrów (kryteriów) funkcji oceniającej należy nadać każdemu z nich konkretną wagę. Bardzo pracochłonnym etapem analiz jest nadanie odpowiedniego znaczenia kryteriom, które podlegają ocenie. Współczynniki wag zostały opracowane na podstawie wielokrotnych analiz różnych przypadków. Wartości współczynników są bowiem zależne od wielu czynników, jak na przykład:

- przyspieszenia dośrodkowego,
- przyspieszenia odśrodkowego,
- profilu terenu,
- wysokości nasypu / głębokości przekopu,
- promienia łuku (łuków) istniejącego R ,
- długości krzywych przejściowych istniejących L_i ,
- kąta zwrotu trasy,
- zastosowanego typu szyny.

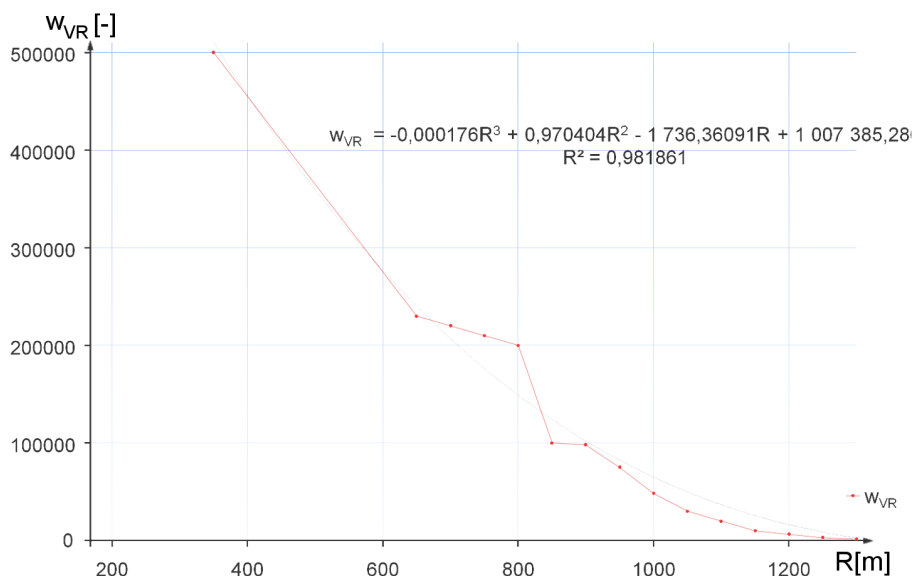
Trudno jest więc określić jedną wartość współczynnika dla wszystkich przypadków. W omawianym algorytmie wielokryterialnym zastosowano cztery różne współczynniki wag. Współczynniki te mają wpływ na znaczenie każdego z omawianych parametrów. Wartości liczbowe przeliczników, związanych między innymi z ujednocnieniem jednostek, zostały zaimplementowane wewnątrz algorytmu w taki sposób, aby można było w przejrzysty sposób nadawać znaczenie wybranym parametrom.

Współczynnik wagi prędkości został oznaczony w_{pred} . Waga ta została ustalona przy wykorzystaniu regresji. Po wielokrotnym przetestowaniu algorytmu optymalizacyjnego zaobserwowano zakresy współczynników, dla których wyniki obliczeń były wystarczająco dobre. Cechą pożądaną GA jest różnorodność i duża liczebność generowanych rozwiązań. Przy wykonywaniu obliczeń każdorazowo sprawdzano rozwiązania i oceniano ich przydatność. Zaobserwowano zależność występującą przy określaniu współczynnika wagi wpływającego na znaczenie prędkości w algorytmie. Wartości te są zmienne i zależą od wielkości promienia istniejącego R . Możliwy jest zatem zapis:

$$w_{pred} = w_{VR} \cdot \theta \quad (6.6)$$

gdzie:

- w_{pred} waga dotycząca prędkości maksymalnej,
- w_{VR} współczynnik zależny od promienia łuku istniejącego,



Rys. 6.1. Wykres zależności wagi prędkości od wartości promienia istniejącego

θ współczynnik równania; wartość współczynnika powyżej 1 zwiększa znaczenie prędkości, poniżej 1 je zmniejsza – dobrane według potrzeb projektanta.

Wartość współczynnika w_{VR} określona została równaniem:

$$w_{VR} = 0,000176R^3 + 0,9704R^2 - 1736,3609R + 1007385 \quad (6.7)$$

Kolejną wagą występującą w równaniu funkcji celu jest waga odnosząca się do kosztu cyklu życia LCC. Jej wartość została powiązana z długością projektowanych układów geometrycznych i musi być wyznaczona osobno dla każdego osobnika. W procedurze obliczającej wartość kosztu cyklu życia szyn uwzględnione zostały przypadki (promień układu projektowanego wynoszący poniżej 800 m), w których należy zastosować stal twardszą R350HT (tj. na całej długości krzywych przejściowych). Stąd przy analizowaniu współczynnika wagi nie było potrzeby uwzględniania różnych gatunków stali szynowej. Wartość współczynnika dotyczącego LCC można opisać zależnością:

$$w_{LCC} = \frac{(L_{M_1} + k_M + L_{M_2})}{\eta} \quad (6.8)$$

gdzie:

w_{LCC} waga dotycząca LCC,
 L_{M_1} długość pierwszej krzywej przejściowej,
 L_{M_2} długość drugiej krzywej przejściowej,
 k_M długość części kołowej łuku projektowanego,
 η współczynnik równania; wartość współczynnika powyżej 1 zmniejsza wartość kosztu, poniżej 1 ją zwiększa – dobrane według potrzeb projektanta.

Waga dotycząca LCC jest przemnażana przez wartości kosztów LCC szyn kolejowych dla każdego analizowanego przypadku.

Ustalenie współczynnika wagi dotyczącej zakresu robót ziemnych również wymagało przeprowadzenia odpowiedniej analizy. Przeanalizowano wiele przypadków różniących się nie tylko wartością promienia istniejącego, ale również warunkami terenowymi (zmiennym nachyleniem profilu podłużnego, różnymi wysokościami nasypów). Zauważono, w zakresie jakich wartości zmiany współczynnika wag dotyczącego objętości robót ziemnych będą generowały rozwiązania o jak najmniejszym koszcie związanym z robotami ziemnymi. Ponieważ wartość funkcji celu FF jest zależna od wielu parametrów, ustalono wpływ współczynnika dotyczącego objętości robót ziemnych na znajdowanie rozwiązań dla zadanej prędkości. Uzależnienie współczynnika wagi w_{pred} od promienia istniejącego powiązało wartość prędkości z objętością robót ziemnych. Wartość współczynnika wagi dotyczącej objętości została opisana równaniem:

$$w_{obj} = \frac{w_j}{\zeta} \quad (6.9)$$

gdzie:

- w_{obj} waga dotycząca objętości robót ziemnych,
- w_j przelicznik ujednociający wartości jednostek,
- ζ współczynnik równania; wartość współczynnika powyżej 1 zmniejsza wartość zakresu robót ziemnych, poniżej 1 ją zwiększa – dobrane według potrzeb projektanta.

Dla tak przyjętych współczynników wag funkcję celu można opisać równaniem:

$$FF = \left\{ \frac{2L_M + k_M}{\eta} \cdot LCC_{szyn} + \frac{w_j}{\zeta} \cdot |RZ| + \theta \cdot (0,000176R^3 + 0,9704R^2 - 1736,361R + 1007385) \cdot V_{max}^2 \right\}^{-1} \quad (6.10)$$

Funkcja w takiej formie jest wyznaczana dla wszystkich chromosomów z osobna. Im jej wartość jest większa, tym korzystniej z punktu widzenia optymalizacji. Po odpowiednim uszeregowaniu i nadaniu rang osobnikom określone jest prawdopodobieństwo wyboru danego rozwiązania. Wartość prawdopodobieństwa uzależniona jest od rang rozwiązania. Po ustaleniu wartości prawdopodobieństwa każdego osobnika budowane jest koło ruletki. Wartości prawdopodobieństw odpowiadają fragmentom koła. Im wartość ta jest większa, tym większy jest udział przypadający na danego osobnika.

6.3. Operatory genetyczne

Po określeniu składu populacji należy przejść do kolejnego etapu obliczeń – działania operatorów genetycznych. Ustalono, że na tym etapie wszystkie osobniki powinny zostać zakodowane binarnie. Osobnik nadal będzie składał się z dwóch segmentów (genów), jednak wartości promienia i długości krzywych przejściowych będą odpowiadały ciągom liczb równym zero lub jeden. Sposób, w jaki osobniki kodowane są binarnie, został przedstawiony w rozdziale 2.3.

W opracowanym algorytmie mogą wystąpić dwa rodzaje operatorów. Pierwszy z nich jest operatorem wieloargumentowym. Na wejściu przyjmowane są dwa osobniki, z których tworzone są dwa nowe. Ponieważ chromosomy wymieniają między sobą informacje (geny), ten typ operatora będzie nazywany krzyżowaniem. Przy tworzeniu algorytmu założono, że krzyżowanie będzie występowało w jednym punkcie chromosomu jako krzyżowanie jednopunktowe. Dwa łańcuchy binarne obcinane są w ustalonym punkcie i wartości ich bitów są ze sobą zamieniane. Punktem granicznym jest w tym przypadku zakończenie genu odpowiadającego za promień łuku kołowego. Drugi z operatorów opiera się na jednym argumencie. Przyjmuje jeden chromosom i na jego podstawie tworzy nowe rozwiązanie. Jest to operator mutacji. Ma on za zadanie wprowadzić losową zmianę w reprezentacji populacji. Umożliwia również wyjście poza optima lokalne; następuje sprawdzenie sąsiedztwa rozwiązań uznawanych za dobre. W tym przypadku działanie operatora sprowadza się do odwrócenia jednego z bitów w łańcuchu chromosomu. Przy binarnym kodowaniu chromosomów wartość 1 zamieniana jest na 0 lub odwrotnie. Zakłada się, że mutacji podlega pewien ustalony procent bitów dla wygenerowanej populacji. Taka zmiana może mieć duży wpływ na reprezentację układów, ale powinna być wykonywana tylko w pewnym zakresie [122].

6.4. Sukcesja i zakończenie obliczeń

Po wykonaniu działań operatorami genetycznymi należy podjąć decyzję o wyborze sposobu sukcesji. W takich przypadkach nie różni się ona znacznie od metody reprodukcji. Na tym etapie należy zdecydować, ile osobników z populacji rodzicielskiej powinno znaleźć się w nowej populacji, a ile osobników nowych należy stworzyć na drodze losowania. W klasycznym podejściu należy wykonać ewaluację rozwiązań i sprawdzić ich przydatność. Chromosomy, które podlegały krzyżowaniu i mutacji, nie mają określonego znaczenia i poprawności. Jednak w opracowanym algorytmie nie wykonano ewaluacji, dzięki czemu osobnik, który został poddany krzyżowaniu lub mutacji, miał większą szansę na przejście do populacji potomnej. Gdyby okazało się, że rozwiązanie to było całkowicie błędne z punktu widzenia projektowania układów geometrycznych – zostałyby usunięty w następnej populacji. W trakcie przeprowadzania analiz zorientowano się, że algorytm skonstruowany właśnie w taki sposób umożliwiał zmianę rozwiązania lokalnie najlepszego i przejście do dalszych poszukiwań innych dobrych rozwiązań. W opracowanym algorytmie ustalono liczbę osobników, które mogą przejść do populacji potomnej, a pozostałą liczbę uzupełniono poprzez losowanie. W tym momencie cała procedura algorytmu była powtarzana od momentu weryfikacji przez reprodukcję i operatory aż do etapu sukcesji.

Wybór metody zakończenia obliczeń jest zazwyczaj dwojaki: obliczenia kończą się w momencie znalezienia wartości wystarczająco dobrej lub algorytm zatrzymywany jest po wykonaniu określonej liczby powtórzeń. Postanowiono, że liczebność populacji zostanie odgórnie podana. Zdecydowano, że algorytm wykona 1000 powtórzeń. Proces taki dla populacji składającej się z 1000 osobników wymaga czasu. Dlatego postanowiono, że na każdym etapie wykonywania obliczeń można algorytm zatrzymać. Ponieważ znane są najlepsze wyniki z każdej populacji, łatwo

zorientować się, że nie następują zmiany w populacjach potomnych. Drugą podstawową przyczyną dla stworzenia możliwości zakończenia algorytmu w dowolnym momencie jest niedopasowanie współczynnika wagi. Dzięki możliwości wcześniejszego zakończenia algorytmu unika się straty czasu wynikającej z błędnie przyjętych założeń lub źle podanych danych wejściowych.

Rozdział 7

Oprogramowanie metody

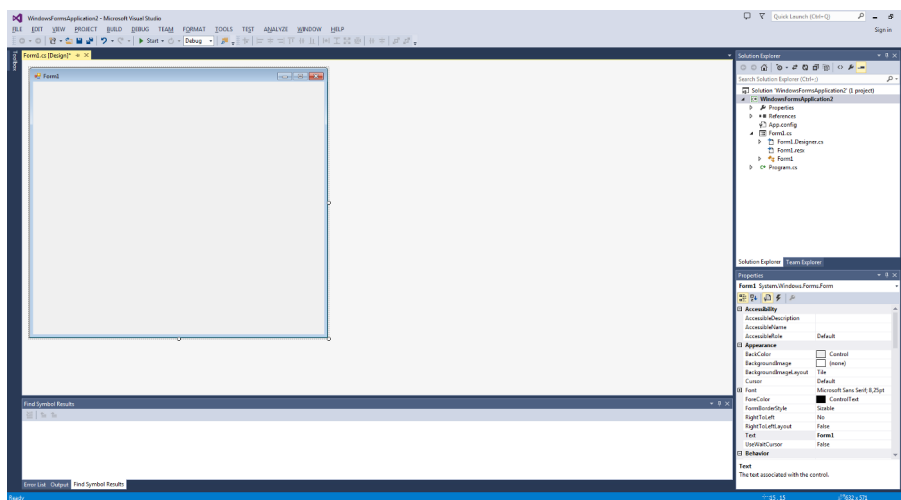
W procesie planowania i tworzenia wariantów projektowych projektanci korzystają z różnego rodzaju narzędzi wspomagających i przyspieszających ich pracę. Ogólnodostępne programy są szeroko stosowane w tego typu zadaniach i z pewnością zawierają wiele pomocnych narzędzi. Postanowiono więc nie konkurować z programami dedykowanymi dla projektantów infrastruktury kolejowej i znaleźć zagadnienie, nie będące częścią składową wykorzystywanego oprogramowania. Najbardziej rozpowszechnione programy działają na dwóch niezależnych platformach: AutoCad firmy Autodesk i Microstation firmy Bentley. Pośród różnorodnych akcesoriów tego oprogramowania można znaleźć narzędzia odtwarzające kształt układów torowych zarówno w planie jak i profilu. Wizualnie lub z wykorzystaniem narzędzi pomiarowych można sprawdzić, czy zaprojektowany układ geometryczny mieści się w planowanym zakresie terenowym (na wykupionych działkach), czy nie koliduje z istniejącymi elementami infrastruktury. Programy wspomagające projektowanie układów torowych dedykowane pod ww. platformy posiadają szereg innych funkcji pozwalających na generowanie bardziej złożonych układów geometrycznych, takich jak gładkie krzywe przejściowe czy też drogi rozjazdowe. Dodatkowo, z wykorzystaniem dołączonych w tych programach funkcjonalności, można w prosty sposób tworzyć dokumentację techniczną poprzez zintegrowanie takich elementów projektu, jak plan sytuacyjny, rozwinięcie podłużne projektowanej trasy oraz jej przekroje poprzeczne [66]. Wymienione programy CAD (Computer Aided Design) umożliwiają projektowanie takich wariantów ukształtowania geometrycznego, jak: łuk kołowy z dwiema krzywymi przejściowymi (dowolnego typu i o zróżnicowanej długości obu krzywych), łuk koszowy składający się z łuków kołowych i krzywych przejścia o zmiennej krzywiznie, łuk paraboliczny, łuki odwrotne w różnych wariantach (z dwiema krzywymi przejściowymi, z wstawką prostą). Można również dobrać zaprojektowany typ krzywej przejściowej, np.:

- parabolę sześcienną,
- kłotoidę,
- parabolę czwartego stopnia,
- krzywą Blossa,
- krzywą sinusoidalną.

Warunkiem prawidłowego wykonania projektu jest znajomość zasadniczych zaprojektowanych parametrów układu. Dalsza praca jest bardzo zautomatyzowana, choć wymaga dobrej znajomości omawianych programów. Programy te mają co prawda interfejs zgodny z platformami, na których pracują, są jednak dużo bardziej złożone i wymagają praktyki w ich wykorzystywaniu.

7.1. Wybór platformy oprogramowania

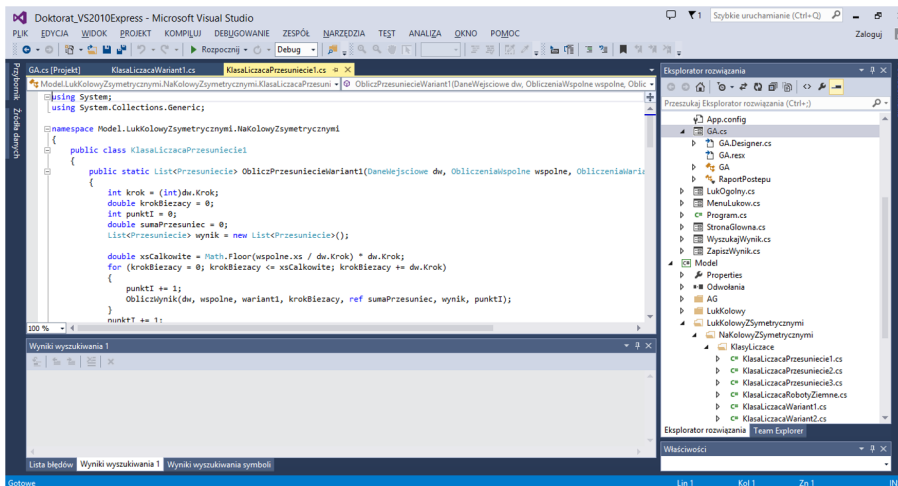
Rozwiązanie zagadnienia optymalizacji wielokryterialnej jest zadaniem trudnym bez wykorzystania narzędzi wspomagania komputerowego, szczególnie jeśli do metody wykorzystywany jest algorytm genetyczny, który bazuje na bardzo dużej liczbie różnorodnych rozwiązań. Postanowiono więc napisać oprogramowanie wspomagające ten proces. Rozpatrywane zagadnienie nie zostało jeszcze zaimplementowane do znanych i wykorzystywanych programów wspomagających projektowanie, dlatego też zasadne jest stworzenie takiego narzędzia. Przyjęto założenia dotyczące programu – nazwanego MUGO (akronim od Modernizacja Układów Geometrycznych tOru) [77,112–114,119] i zdecydowano, że program ten powinien być stworzony w języku programowania C#. Język C# (czyt. si – szarp) jest jednym z nowoczesnych języków programowania obiektowego, łączącym zalety języków C++ i Java, dodatkowo ułatwienia zapożycza z języka Basic [107]. Program MUGO został stworzony w środowisku platformy ".NET.4.0.". Platforma .NET skupia w sobie zbiór wielu różnych języków programowania, które działają w środowisku Visual, np. Visual Basic, Visual C++, Visual C#, Visual J# [95]. Jednym z atutów, jakie przynosi praca w .NET, jest przejrzysty dla użytkownika wygląd aplikacji. Aplikacje okienkowe (Windows Forms) wykorzystywane do tworzenia programu mają bowiem standardowy dla systemu Windows interfejs. Wygląd środowiska programistycznego Microsoft Visual Studio przedstawiono na rysunku 7.1. Natomiast rysunek 7.2 prezentuje okno z kodem programu w jednej z klas obliczeniowych programu MUGO.



Rys. 7.1. Przykładowy widok interfejsu użytkownika w platformie .NET.4.0

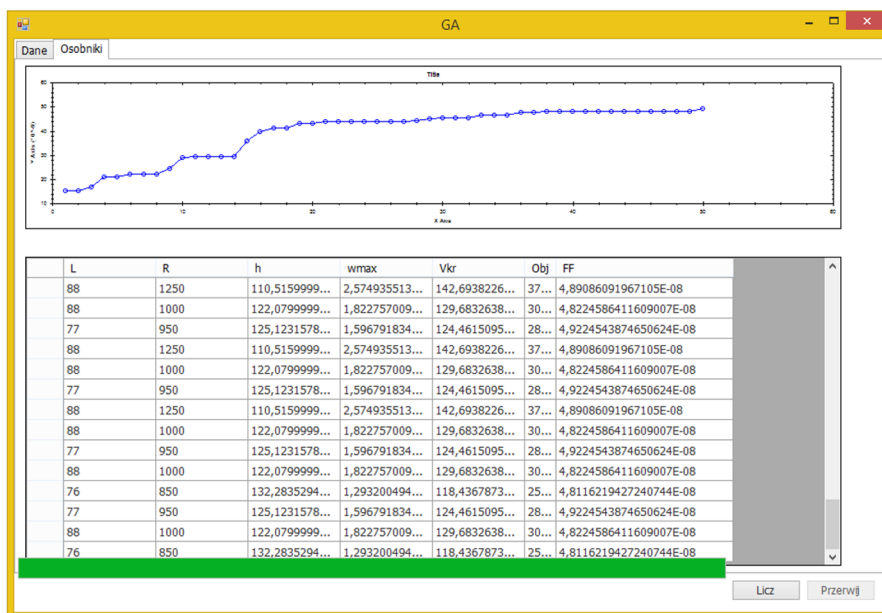
7.2. Architektura programu MUGO

Przed przystąpieniem do kształtowania architektury programu niezbędne było opracowanie pewnych założeń dotyczących jego funkcjonowania i wykorzystania. Przyglądając się dostępnym programom, znając ich zalety i wady postanowiono, że istotnymi cechami takiego programu powinna być:



Rys. 7.2. Przykładowe zakładki z kodem obliczeniowym programu MUGO

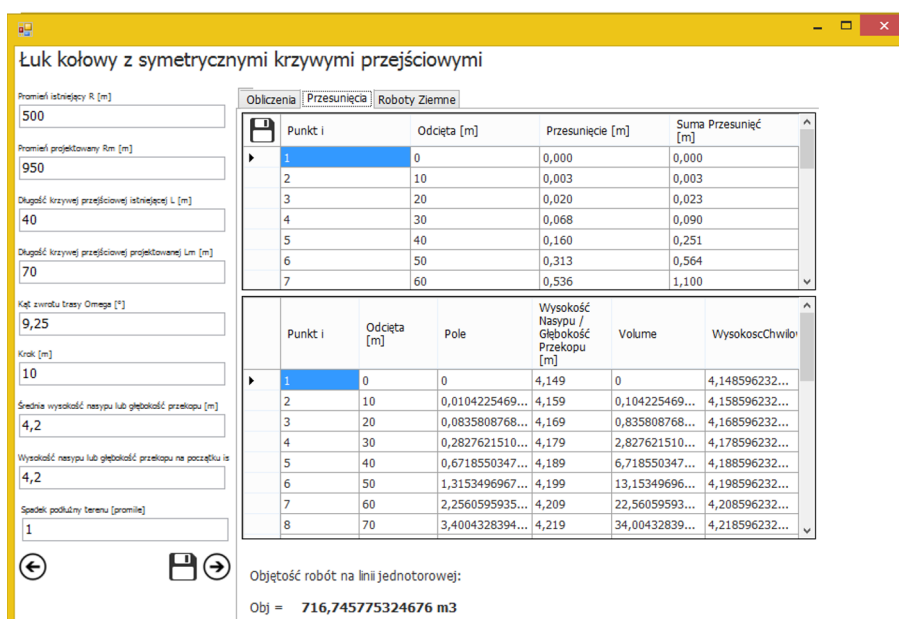
- ❑ innowacyjność – narzędzia projektowe niedostępne w innych programach projektowych;
- ❑ czytelność interfejsu dla każdego użytkownika;
- ❑ współpraca z bazą danych;
- ❑ możliwość korzystania z informacji dostarczonych w innych programach.



Rys. 7.3. Przykładowy widok okna modułu optymalizacyjnego

Program zawiera narzędzia optymalizacyjne, opierające się na samodzielnie opracowanym i dostosowanym algorytmie genetycznym, mogące znacznie skrócić proces tworzenia wariantów projektowych na etapie planowania lub studium wykonalności. Nie jest to jednak jedyna funkcja programu. Opracowane algorytmy obliczające

zakres robót ziemnych i przesunięcia osi toru – dla wszystkich przypadków omawianych w poprzedzających rozdziałach – zostały również zaimplementowane. Można w ten sposób analizować poszczególne rozwiązania indywidualnie, np. w celu sprawdzenia, czy planowany wariant mieści się na istniejącym obiekcie inżynierskim lub wykupionych działkach. Interfejs użytkownika pozwala na wprowadzanie



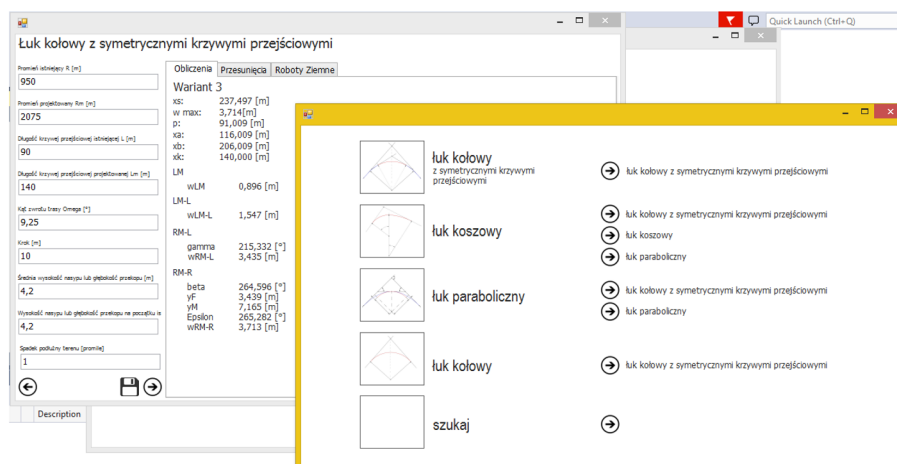
Rys. 7.4. Przykładowy widok interfejsu modułu dotyczącego rozwiązań szczegółowych

danych wejściowych we wskazane przez program okienka. Jest to forma bardzo czytelna, każde okienko jest dokładnie opisane słownie z odpowiednim symbolem i jednostką. W razie wprowadzenia nieprawidłowych danych użytkownik jest o tym informowany poprzez pojawiające się komunikaty. Opracowane wcześniej wagi dotyczące procesu optymalizacyjnego są wpisane w okienka – jednak każdą z wartości można dostosować do indywidualnych potrzeb i zmienić na każdym etapie korzystania z programu. W trakcie pracy można korzystać z wielu okienek generowanych przez program i porównywać pojawiające się rozwiązania.

W programie umożliwiono zapis rozpatrywanych przypadków i rozwiązań w pamięci komputera oraz stworzono możliwość kontaktowania się użytkownika (poprzez interfejs) z zewnętrzną bazą danych. Takie rozwiązanie ułatwia archiwizowanie wyników pracy i porównywanie wygenerowanych rozwiązań.

MUGO składa się z dwóch modułów: optymalizacji z wykorzystaniem algorytmu genetycznego (rys. 7.3) i obliczeń szczegółowych dla poszczególnych przypadków (rys. 7.4 i rys. 7.5).

Oba moduły programu działają niezależnie, dzięki czemu można w tym samym czasie generować warianty projektowe i poddawać je szczegółowej ocenie.



Rys. 7.5. Przykładowy widok modułu dotyczącego rozwiązań szczegółowych

7.3. Obsługa programu MUGO

7.3.1. Moduł optymalizacyjny

Rozpoczęciem pracy w module optymalizacyjnym programu MUGO jest wprowadzenie (poprzez wpisanie liczb w opisane okienka) danych wejściowych:

- promienia istniejącego łuku w m ,
- długości istniejących krzywych przejściowych w m ,
- kąta zwrotu trasy w $^\circ$,
- kroku obliczeniowego w m ,
- przyspieszenia odśrodkowego w m/s^2 ,
- przyspieszenia dośrodkowego w m/s^2 ,
- wysokości nasypu (wartość dodatnia) lub głębokości przekopu (wartość ujemna) w m ,
- spadku podłużnego terenu (wartość dodatnia oznacza wzniesienie na przyrastającej wartości kilometrażu) w $\%$,
- spadku poprzecznego terenu w $\%$,
- współczynnika robót ziemnych (ustawiony jest na wartość 1 z możliwością zmiany i odpowiada współczynnikowi ζ opisanemu w rozdziale 6),
- współczynnika LCC (ustawiony jest na wartość 1 z możliwością zmiany i odpowiada współczynnikowi η opisanemu w rozdziale 6),
- współczynnika prędkości (ustawiony jest na wartość 1 z możliwością zmiany i odpowiada współczynnikowi θ opisanemu w rozdziale 6).

W razie potrzeby można dane wejściowe uzupełnić o minimalne zakładane przez użytkownika wartości:

- promienia projektowanego w m ,
- długości krzywych przejściowych w m .

Proces optymalizacji rozpoczynany jest poprzez naciśnięcie przycisku oznaczonego „Licz”. W trakcie trwania obliczeń można na bieżąco śledzić wyniki; w tym celu należy przejść do zakładki *Osobniki*. Najlepiej przystosowane osobniki są wyświetlane w tabeli. Powyżej niej znajduje się okienko z wykresem przedstawiającym

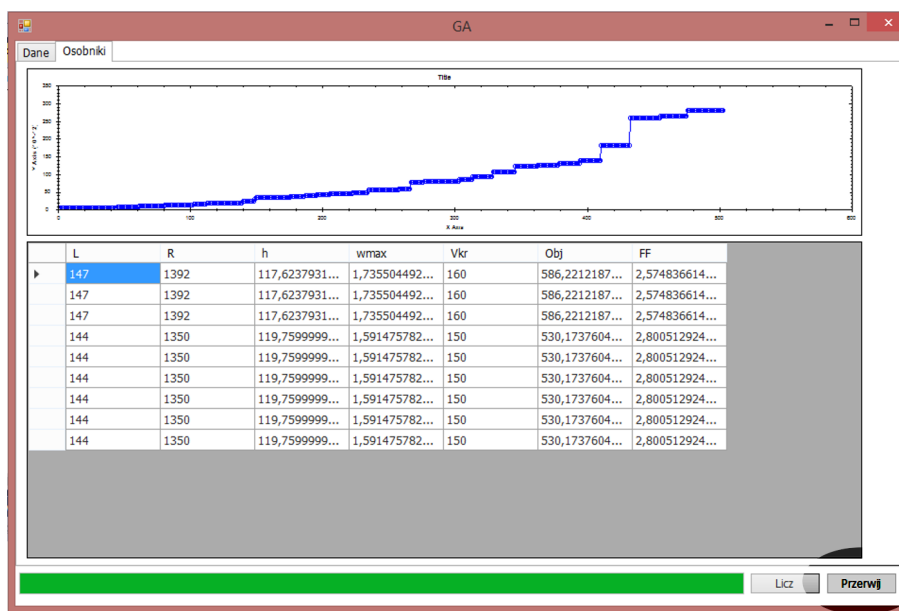
The screenshot shows a window titled "GA" with a tab "Osobniki". Under the heading "Pojedynczy osobnik", there are several input fields for parameters:

- Promień istniejący [m]: 950
- Promień projektowany [m]: 1000
- Długość krzywej przejściowej istniejącej [m]: 90
- Długość krzywej przejściowej projektowanej 1 [m]: 140
- Długość krzywej przejściowej projektowanej 2 [m]: 140
- Kąt zwrotu [stopnie]: 9,25
- Przechyłka [mm]: 90
- Krok [m]: 1
- ap: 0,85
- at: 0,32
- Vp: 160
- Vt: 90
- Wysokość Nasypu / Głębokość przekopu: 2
- Spadek podłużny terenu: 1
- Spadek poprzeczny terenu: 0
- waga odsunięcie: 1, 1, 1
- waga prędkość: 1, 1, 1

At the bottom right, there are buttons labeled "Licz" and "Przerwij".

Rys. 7.6. Przykładowy widok okna z danymi modułu optymalizacyjnego

wartości funkcji dostosowania dla każdego prawidłowego układu geometrycznego. Dla każdego pokolenia rozwiązań wyświetlany jest bieżący wykres. Poniżej tabeli z najlepszymi wynikami znajduje się pasek postępu ułatwiający oszacowanie czasu pozostałego do zakończenia pracy algorytmu optymalizacyjnego. Natomiast tuż obok przycisku „Licz” znajduje się przycisk „Przerwij” (rys. 7.7) umożliwiający zakończenie działania pracy algorytmu w dowolnie wybranym momencie. Jeżeli obliczenia nie zostaną ręcznie zakończone, proces optymalizacyjny zakończy się po przejściu zadanej liczby cykli (pokoleń). W wyniku działania modułu optymalizacyj-



Rys. 7.7. Przykładowy widok okna w module optymalizacyjnym – obliczenia wstrzymane za pomocą przycisku „Przerwij”

nego w wygenerowanej tabeli prezentowane są po trzy najlepsze osobniki z każdej populacji. Określone są następującymi parametrami:

- ❑ promieniem łuku w m ,
- ❑ długościami krzywych przejściowych w m ,
- ❑ zakresem przechyłek w mm ,
- ❑ maksymalnym przesunięciem osi toru w m ,
- ❑ prędkością maksymalną możliwą do uzyskania dla danego układu geometrycznego w km/h ,
- ❑ objętością robót ziemnych w m^3 ,
- ❑ wartością funkcji dostosowania.

7.3.2. Moduł obliczeń szczegółowych

Moduł obliczeń szczegółowych służy do wyznaczania przesunięć osi toru i obliczania objętości robót ziemnych. W module tym rozpatrywane są następujące przypadki układów istniejących:

- ❑ łuki kołowe z krzywymi przejściowymi,
- ❑ łuki paraboliczne,
- ❑ łuki kołowe bez krzywych przejściowych,
- ❑ łuki koszowe.

Założono, że zastosowano krzywą przejściową w postaci paraboli 3-go stopnia. Każdy z układów może zostać zastąpiony poprzez zaprojektowanie łuku kołowego z krzywymi przejściowymi. Dla przypadku łuków parabolicznych i koszowych projektowane układy zostały bardziej rozbudowane. Dla istniejącego łuku parabolicznego obliczenia poszerzone są o projektowany łuk paraboliczny. Natomiast dla istniejącego łuku koszowego dołączono rozwiązanie: projektowanego łuku parabolicznego i koszowego. Podobnie do modułu optymalizacyjnego obliczenia będą

The screenshot shows a software interface for calculating circular curves with symmetrical transition curves. The window title is "Łuk kołowy z symetrycznymi krzywymi przejściowymi". It features several input fields on the left and a "Wariant" section on the right.

Parameter	Value
Promień istniejący R [m]	950
Promień projektowany R_m [m]	2075
Długość krzywej przejściowej istniejącej L [m]	90
Długość krzywej przejściowej projektowanej L_m [m]	140
Kąt zwrotu drogi Ω [°]	9,25
Krok [m]	10
Średnia wysokość nasypu lub głębokość przekapu [m]	4,2
Wysokość nasypu lub głębokość przekapu na początku i	4,2
Spadek podłużny toru (promień)	1

The "Wariant" section on the right lists the following parameters:

Parameter	Value
XS:	-
w max:	-
p:	-
XB:	-
xB:	-
xk:	-

Rys. 7.8. Przykładowy widok okna z wprowadzonymi danymi przed rozpoczęciem obliczeń szczegółowych

wykonywane po przekazaniu odpowiednich danych (rys. 7.8). Dane te, w zależności

od rozpatrywanych przypadków, mogą być mniej lub bardziej szczegółowe. Każdy przypadek jest otwierany w oddzielnym okienku. W najbardziej rozbudowanej formie, dla przypadku łuku koszowego, należy wprowadzić dane:

- promienia pierwszego istniejącego łuku w m ,
- promienia drugiego istniejącego łuku w m ,
- promienia łuku projektowanego w m ,
- długości krzywej przejściowej w m ,
- kąta zwrotu trasy w $^{\circ}$,
- kąta środkowego pierwszego istniejącego łuku kołowego w $^{\circ}$,
- średniej wysokości nasypu (wartość dodatnia) lub głębokości przekopu (wartość ujemna) w m – do obliczeń objętości metodą uproszczoną,
- wysokości nasypu (wartość dodatnia) lub głębokości przekopu (wartość ujemna) w m ,
- spadku podłużnego terenu (wartość dodatnia oznacza wzniesienie na przystającej wartości kilometrażu) w ‰ ,
- spadku poprzecznego terenu w $\%$,
- kroku obliczeniowego w m .

Po wprowadzeniu danych i rozpoczęciu obliczeń w pierwszej zakładce pokazywane są następujące informacje:

- wariant obliczeniowy,
- schemat układu istniejącego i projektowanego,
- przesunięcia osi toru w punktach charakterystycznych,
- wartości odciętych w punktach charakterystycznych,
- wartości kątów i rzędnych wykorzystywanych w obliczeniach.

W kolejnych zakładkach generowane są tabele z wartościami przesunięć z zadanyim krokiem obliczeniowym oraz obliczenia objętości robót ziemnych.

Rozdział 8

Określenie korzyści z projektowanej przebudowy układu – weryfikacja metody na wybranych przykładach

Weryfikacja opracowanej metody została przeprowadzona poprzez porównanie ogólnie stosowanych metod obliczeniowych i wyników otrzymanych na drodze optymalizacji wielokryterialnej.

8.1. Metoda weryfikacji

Opracowywane przykłady obliczeniowe dotyczą projektowania układów geometrycznych w ruchu mieszanym. W tym celu należy określić wartość minimalnego promienia dla takiego rodzaju ruchu [16]:

$$R_{min} = \frac{V_{max}^2 - V_t^2}{12,96(a_{dop} + a_t)} \quad (8.1)$$

Dla tak przedstawionej zależności należy wyznaczyć również graniczną wartość przechyłki.

$$h_{max}^{gr} = \frac{V_{max}^2 \cdot a_t + V_t^2 \cdot a_{dop}}{\frac{g}{s} \cdot (V_{max}^2 - V_t^2)} \quad (8.2)$$

Należy zaznaczyć, że w opisywanej metodzie najczęściej zakłada się zaokrąglenie wartości promienia do najbliższej wartości 50 m w górę. W przypadku przekroczenia wartości maksymalnej przechyłki $h = 150$ mm, zgodnie z [1], korygowana jest wartość przyspieszenia dośrodkowego. Dokładny opis omówionej metody obliczeniowej został przedstawiony w pracy [16]. Dla tak przyjętych wartości minimalnych promienia (należy porównać wartość promienia minimalnego z wartościami granicznymi podanymi w przepisach i wybrać wartość większą) określa się następnie wartości przechyłki minimalnej i maksymalnej. Jeżeli wartość przechyłki minimalnej jest większa od maksymalnej należy zwiększyć promień. Dla przyjętej przechyłki wyznaczana jest minimalna długość krzywej przejściowej z uwzględnieniem parametrów kinematycznych i geometrycznych. Długość krzywej jest zaokrąglana w górę do najbliższego metra. Głównym problemem wynikającym z omawianej metody jest projektowanie „na” parametry graniczne. W metodzie tej uwzględnia się zasadniczo długość całego układu, bez uwzględniania innych istotnych czynników mających wpływ na eksploatację czy zakres robót ziemnych.

8.2. Określenie danych wejściowych

Na potrzeby weryfikacji metody wielokryterialnej zostały określone dane wejściowe dotyczące kolejnych 5 układów geometrycznych. Dla wszystkich przypadków zostały określone parametry układu istniejącego i zalecenia dotyczące nowo projektowanego układu. Układy istniejące zostały nieprzypadkowo dobrane, począwszy od układów cechujących się bardzo małym promieniem łuku o wartości poniżej 450 m, skończywszy na układach o promieniach łuku 2000 m. Założono, że żaden z układów nie spełnia przyjętego kryterium projektowego związanego z osiągnięciem zakładanej prędkości maksymalnej V_{max} . Każdy z układów cechował się inną wartością kąta zwrotu trasy ω i inną sytuacją terenową (spadki podłużne, wysokości nasypów/głębokości przekopów istniejących). Obliczenia prowadzono zgodnie z kilometrażem, z czego wynikał przyjmowany znak pochyłeń podłużnych trasy.

8.3. Pierwszy przykład obliczeniowy

W pierwszym przykładzie obliczeniowym istniejący układ geometryczny złożony z łuku kołowego z dwoma krzywymi przejściowymi o tej samej długości został określony poprzez następujące parametry:

- promień istniejący $R = 350$ m,
- długość krzywej przejściowej istniejącej $L_i = 50$ m,
- kąt zwrotu trasy $\omega = 22, 25^\circ$,
- zakładana prędkość maksymalna $V_{max} = 160$ km/h,
- uśredniona prędkość najwolniejszych, kursujących regularnie pojazdów kolejowych $V_t = 90$ km/h,
- obciążenie linii ruchem towarowym $Q = 21$ Tg/rok,
- wysokość nasypu na początku istniejącej krzywej przejściowej $H = 1$ m,
- pochylenie podłużne terenu $i_{pod} = -8\%$.

Dla przedstawionego układu istniejącego obliczono maksymalną możliwą do uzyskania prędkość zgodnie z przepisami [1]. Obliczenia wykonywano iteracyjnie, sprawdzając kolejne prędkości, począwszy od wartości założonej w projekcie. W tym przypadku możliwa do uzyskania prędkość jest ograniczona zarówno przez wartość promienia, jak i długość krzywej przejściowej. W obliczeniach zastosowano wartości dopuszczalne przyrostu przyspieszenia $\psi = 0,3$ m/s³ oraz prędkość podnoszenia koła na rampie przechyłkowej $f = 35$ mm/s. Prędkość maksymalna z uwagi na promień, długości krzywych przejściowych i długość części kołowej łuku wyniosła $V_{max} = 50$ km/h (założono prędkość najwolniejszych pociągów równą $V_t = 40$ km/h). Do uzyskania rozwiązania spełniającego kryterium prędkości należy istniejący układ zmodernizować stosując się do przepisów [1, 7]. Zakłada się, że nowy układ będzie projektowany dla parametrów kinematycznych:

- przyspieszenia odśrodkowego $a_{dop} = 0,85$ m/s²,
- przyspieszenia dośrodkowego $a_t = 0,32$ m/s²,
- przyrostu przyspieszenia niezrównoważonego $\psi = 0,3$ m/s³,
- prędkości podnoszenia koła na rampie przechyłkowej $f = 28$ mm/s.

Wartość promienia minimalnego dla zakładanych w projekcie prędkości wynosi:

$$R_{min} = \frac{160^2 - 90^2}{12,96(0,85 + 0,32)} = 1154,110 \text{ m} \approx 1200 \text{ m} \quad (8.3)$$

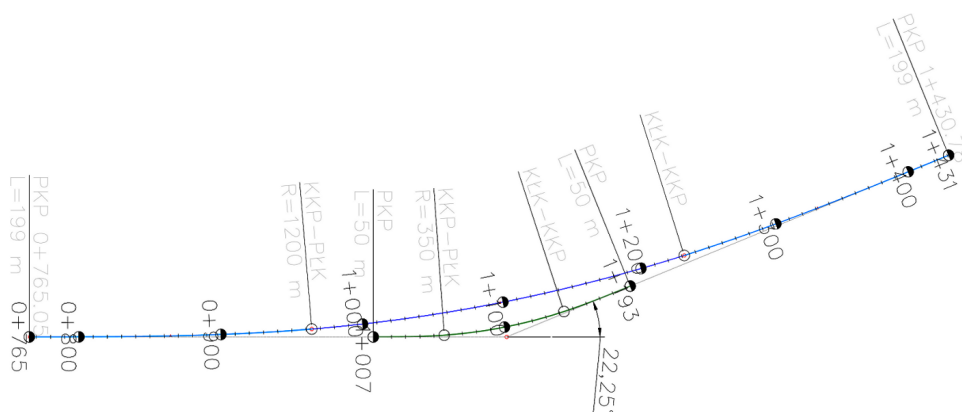
Graniczna dopuszczalna wartość przechyłki wynosi:

$$h_{max}^{gr} = \frac{160^2 \cdot 0,32 + 90^2 \cdot 0,85}{0,00654 \cdot (160^2 - 90^2)} = 131,734 \text{ mm} \approx 130 \text{ mm} \quad (8.4)$$

Dla założonego promienia $R_M = 1200 \text{ m}$ wyznaczana została wartość przechyłki minimalnej i maksymalnej:

$$h_{min} = \frac{11,8V_{max}^2}{R} - 153 \cdot a_{dop} = \frac{11,8 \cdot 160}{1200} - 153 \cdot 0,85 = 121,683 \approx 125 \text{ mm} \quad (8.5)$$

$$h_{max} = \frac{11,8V_t^2}{R} + 153 \cdot a_t = \frac{11,8 \cdot 90}{1200} + 153 \cdot 0,32 = 128,610 \approx 125 \text{ mm} \quad (8.6)$$



Rys. 8.1. Plan sytuacyjny układu istniejącego i projektowanego bez optymalizacji dla pierwszego przypadku obliczeniowego

Do dalszych obliczeń przyjęto przechyłkę o wartości $h = 125 \text{ mm}$. Kolejnym etapem obliczeń było określenie minimalnej długości krzywej przejściowej. Długość krzywej przejściowej wyznaczono z zależności:

$$L_{min}^{\psi} = \frac{a_{dop} \cdot V_{max}}{3,6\psi_{dop}} = \frac{0,85 \cdot 160}{3,6 \cdot 0,3} = 125,926 \approx 126 \text{ m} \quad (8.7)$$

jednocześnie wartość ta nie może być mniejsza niż:

$$L_{min}^f = \frac{V_{max} \cdot h}{3,6f} = \frac{160 \cdot 125}{3,6 \cdot 28} = 198,413 \approx 199 \text{ m} \quad (8.8)$$

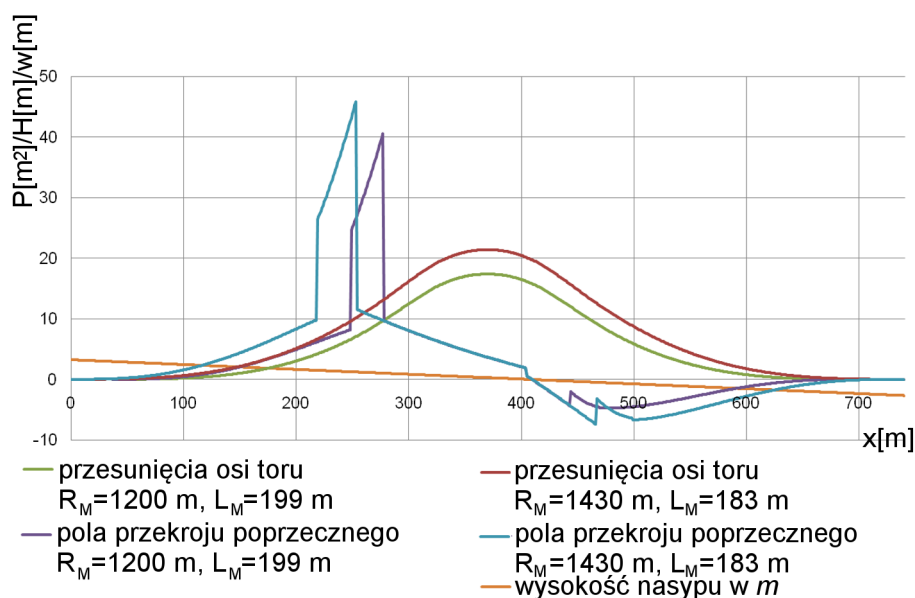
Ze względu na dokładność tyczenia minimalna długość krzywej przejściowej wynosi:

$$L_{min}^n = 0,7\sqrt{R_M} = 0,7\sqrt{1200} = 24,249 \approx 25 \text{ m} \quad (8.9)$$

Założono zaprojektowanie krzywej o długości $L_M = 199$ m. Sprawdzono, czy dla tego przypadku długość części kołowej będzie spełniała warunki opisane w przepisach [1, 7]:

$$k_{min} = \sup\left(\frac{V_{max}}{2,5}; 30\right) = \sup\left(\frac{160}{2,5}; 30\right) = 64 \text{ m} \quad (8.10)$$

Warunek na minimalną długość części kołowej jest spełniony. Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń dla tak przyjętych danych, długość części kołowej wynosi $k = 265,771$ m.



Rys. 8.2. Porównanie pól przekroju poprzecznego i przesunięć osi toru dla dwóch wybranych projektowanych łuków – pierwszy przykład obliczeniowy

Wykorzystując moduł obliczeń szczegółowych programu MUGO wyznaczono przesunięcia na całej długości układu i zakres przewidywanych robót ziemnych. Dla układu zaprojektowanego przedstawioną metodą maksymalne przesunięcia osi toru $w_{max} = 17,356$ m. Objętość robót ziemnych wynosi $Obj = 1533,141$ m³.

Omawiany przypadek układu istniejącego został wprowadzony do programu MUGO. Przeprowadzono optymalizację wielokryterialną, a przykładowe rozwiązania zostały pokazane w tabeli 8.1.

W pierwszym przykładzie obliczeniowym objętość robót ziemnych potrzebna do wykonania modernizacji wyniosła $Obj = 1533,141$ m³. Projektowany układ umożliwiał przejazd z prędkością $V_{max} = 160$ km/h. Przykładowe wyniki wygenerowane przez algorytm optymalizacyjny są zbliżone do przyjętego rozwiązania. Dla przyjętych wag na pozór nie widać rozwiązań lepszych. Algorytm wyszukuje rozwiązania, które mają większą wartość przesunięcia i objętości robót ziemnych. Natomiast w miarę generowania coraz nowych osobników zauważono tendencję do szukania rozwiązań o wyższej wartości prędkości maksymalnej. W tym przypadku mała wielkość istniejącego promienia, długości krzywych przejściowych i dany kąt zwrotu trasy powodują, że wszystkie rozwiązania będą wymagały przesunięcia osi toru przekraczającego krawędź torowiska. Jak widać, układy geometryczne opisane numerami od 14 do 21 (tab. 8.1) mają wyższą prędkość maksymalną $V_{max} = 170$ km/h i stosunkowo nie wiele większe wartości przesunięć maksymalnych. Można więc

	L_M [m]	R_M [m]	w_{max} [m]	V_{max} [km/h]	Obj [m ³]
1	175	1352	19,83581498	160	1704,718016
2	176	1357	19,93887141	160	1746,735732
3	135	1425	20,82293781	160	1787,04103
4	136	1432	20,96227731	160	1791,169059
5	136	1433	20,98105307	160	1796,560883
6	136	1435	21,01860615	160	1809,128628
7	166	1422	21,04001998	160	1810,816831
8	137	1455	21,40206816	160	1813,885978
9	180	1412	20,99716665	160	1814,832858
10	164	1400	20,61173642	160	1819,545952
11	180	1419	21,1265094	160	1857,317239
12	139	1481	21,90609642	160	1862,785874
13	138	1457	21,44749732	160	1868,615318
14	183	1430	21,36158635	170	1860,00852
15	171	1481	22,18518712	170	1913,41096
16	171	1478	22,12940302	170	1931,680387
17	171	1487	22,29677556	170	1951,093539
18	172	1500	22,54816937	170	1960,879763
19	171	1484	22,24097798	170	1968,289222
20	172	1492	22,39936517	170	1978,487273
21	173	1516	22,85539946	170	2024,785198

Tab. 8.1. Przykładowe rozwiązania dla pierwszego przypadku obliczeniowego

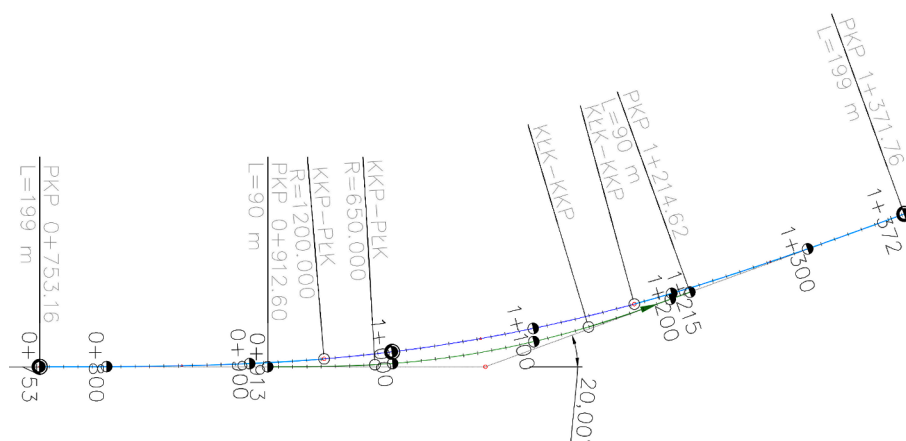
zastanowić się nad przyjęciem układu dostosowanego do wyższej prędkości. Jeżeli na dłuższym odcinku linii jest możliwość jazdy z wyższą prędkością lub wykonywana jest modernizacja dłuższego odcinka linii do wyższej prędkości, to rozwiązania otrzymane na drodze optymalizacji mogą stanowić warianty projektowe. Na rysunku 8.2 przedstawiono porównanie przesunięć na długości układów i zakresu robót ziemnych dla przypadku obliczonego bez optymalizacji i rozwiązania nr 14 z tabeli 8.1.

Warto zwrócić również uwagę na to, że promowane są rozwiązania o większej wartości promienia – takie rozwiązania są bowiem bardziej korzystne z uwagi na utrzymanie. Gdyby wartość współczynnika wagi dotyczącej objętości robót ziemnych (pośrednio przesunięć) została zwiększona dziesięciokrotnie, to w rozwiązaniach brakowałyby tych o większej wartości prędkości maksymalnej. W sytuacji dziesięciokrotnego zwiększenia wagi prędkości nastąpiłaby całkowita dominacja rozwiązań z prędkością maksymalną rzędu 250 km/h.

8.4. Drugi przykład obliczeniowy

Drugi przykładowy istniejący układ geometryczny, złożony z łuku kołowego z dwoma krzywymi przejściowymi o tej samej długości, został określony poprzez następujące parametry:

- promień istniejący $R = 650$ m,
- długość krzywej przejściowej istniejącej $L_i = 90$ m,
- kąt zwrotu trasy $\omega = 20^\circ$,
- zakładaną prędkość maksymalną $V_{max} = 160$ km/h,
- uśrednioną prędkość najwolniejszych, kursujących regularnie pojazdów kolejowych $V_t = 90$ km/h,
- obciążenie linii ruchem towarowym $Q = 22$ Tg/rok,
- wysokość nasypu na początku istniejącej krzywej przejściowej $H = -6$ m,
- pochylenie podłużne terenu $i_{pod} = 3\%$.



Rys. 8.3. Plan sytuacyjny układu istniejącego i projektowanego bez optymalizacji dla drugiego przypadku obliczeniowego

Założono (podobnie jak dla przykładu pierwszego) uzyskanie prędkości $V_{max} = 160$ km/h. Po istniejącym układzie można poruszać się maksymalnie z prędkością $V_{max} = 110$ km/h przy założeniu, że zastosuje się dopuszczalną wartość prędkości podnoszenia koła po rampie $f = 35$ mm/s. Dla wartości zasadniczej $f = 28$ mm/s prędkość maksymalna wynosi $V_{max} = 100$ km/h. Decydujący wpływ na wartość maksymalnej prędkości mają w tym przypadku długości krzywych przejściowych. Istniejący promień ogranicza prędkość do $V_{max} = 120$ km/h, należy jednak zaznaczyć, że wykorzystane zostały w obliczeniach parametry dopuszczalne według [1]. Zakłada się, że nowy układ będzie projektowany dla parametrów kinematycznych:

- przyspieszenia odśrodkowego $a_{dop} = 0,85$ m/s²,
- przyspieszenia dośrodkowego $a_t = 0,32$ m/s²,
- przyrostu przyspieszenia niezrównoważonego $\psi = 0,3$ m/s³,
- prędkości podnoszenia koła na rampie przechyłkowej $f = 28$ mm/s.

Wartość promienia minimalnego dla zakładanych w projekcie prędkości wynosi:

$$R_{min} = \frac{160^2 - 90^2}{12,96(0,85 + 0,32)} = 1154,110 \text{ m} \approx 1200 \text{ m} \quad (8.11)$$

Graniczna dopuszczalna wartość przechyłki wynosi:

$$h_{max}^{gr} = \frac{160^2 \cdot 0,32 + 90^2 \cdot 0,85}{0,00654 \cdot (160^2 - 90^2)} = 131,734 \text{ mm} \approx 130 \text{ mm} \quad (8.12)$$

	L_M [m]	R_M [m]	w_{max} [m]	V_{max} [km/h]	Obj [m ³]
1	207	2418	27,49338753	210	-1115,379578
2	196	2417	27,40184592	210	-1122,688029
3	207	2416	27,46314554	210	-1161,110893
4	201	2413	27,37551342	210	-1194,140869
5	207	2413	27,41778445	210	-1224,962597
6	206	2410	27,36528526	210	-1243,620701
7	207	2412	27,4026646	210	-1247,387744
8	207	2410	27,37242565	210	-1292,788395
9	244	2396	27,45097026	210	-1424,458045
10	205	2396	27,14645231	210	-1499,04194
11	190	2396	27,043416	210	-1547,629164
12	205	2392	27,08596797	210	-1583,617916
13	264	2381	27,40389001	210	-1616,014158
14	204	2381	26,91249984	210	-1770,245504
15	297	2363	27,46194049	200	-1829,29398
16	205	2375	26,82895544	210	-1861,761394
17	203	2374	26,79951757	200	-1868,380287
18	200	2313	25,85578972	200	-2859,321829
19	199	2303	25,69743357	200	-3085,868459
20	193	2218	24,36944494	200	-4217,478871

Tab. 8.2. Przykładowe rozwiązania dla drugiego przypadku obliczeniowego

Dla założonego promienia $R_M = 1200$ m wyznaczana została wartość przechyłki minimalnej i maksymalnej:

$$h_{min} = \frac{11,8V_{max}^2}{R} - 153 \cdot a_{dop} = \frac{11,8 \cdot 160}{1200} - 153 \cdot 0,85 = 121,683 \approx 125 \text{ mm} \quad (8.13)$$

$$h_{max} = \frac{11,8V_t^2}{R} + 153 \cdot a_t = \frac{11,8 \cdot 90}{1200} + 153 \cdot 0,32 = 128,610 \approx 125 \text{ mm} \quad (8.14)$$

Do dalszych obliczeń przyjęto przechyłkę o wartości $h = 125$ mm. Minimalna długość krzywej przejściowej wyznaczona została z wyrażen:

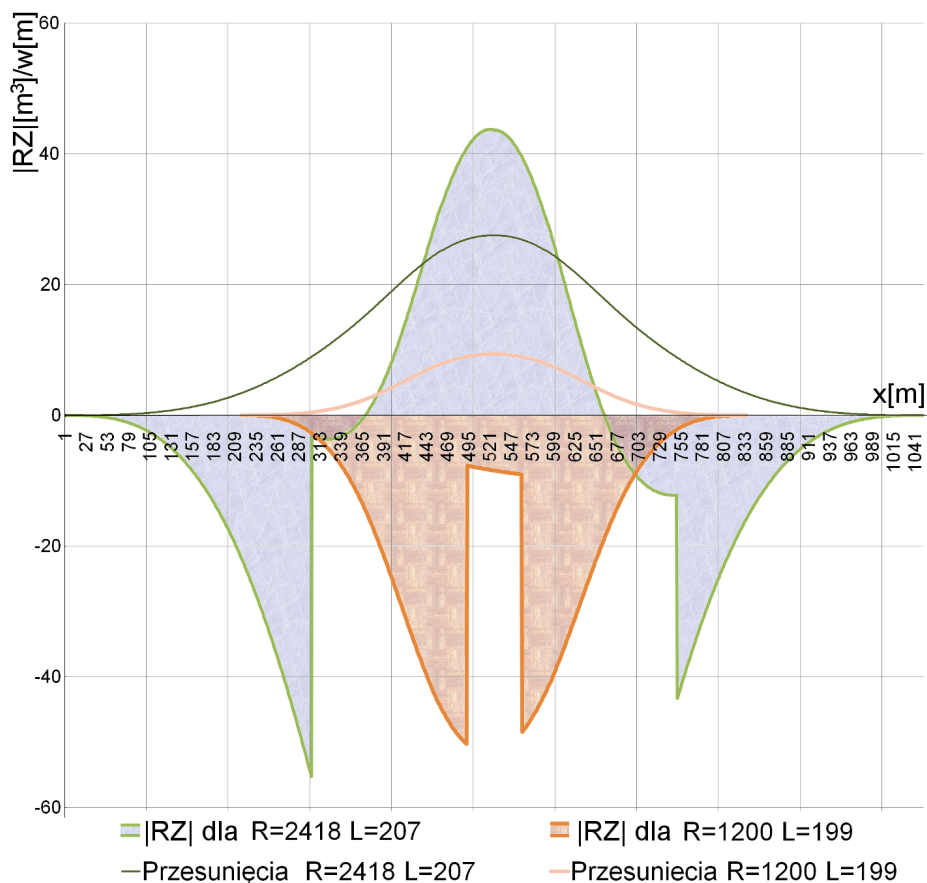
$$L_{min}^{\psi} = \frac{a_{dop} \cdot V_{max}}{3,6\psi_{dop}} = \frac{0,85 \cdot 160}{3,6 \cdot 0,3} = 125,926 \approx 126 \text{ m} \quad (8.15)$$

jednocześnie wartość ta nie może być mniejsza niż:

$$L_{min}^f = \frac{V_{max} \cdot h}{3,6f} = \frac{160 \cdot 125}{3,6 \cdot 28} = 198,413 \approx 199 \text{ m} \quad (8.16)$$

Ze względu na dokładność tyczenia minimalna długość krzywej przejściowej wynosi:

$$L_{min}^n = 0,7\sqrt{R_M} = 0,7\sqrt{1200} = 24,249 \approx 25 \text{ m} \quad (8.17)$$



Rys. 8.4. Porównanie objętości robót ziemnych i odsunięć osi toru dla dwóch wybranych projektowanych łuków – drugi przykład obliczeniowy

Na podstawie wykonanych obliczeń przyjęto, że wartość promienia minimalnego wynosi (tak jak dla pierwszego przypadku) $R_{min} = 1200$ m. Dobrano przechyłkę $h = 125$ mm i odpowiadającą jej długość krzywej przejściowej $L_M = 199$ m. Dla tak zaprojektowanego układu (rys. 8.3) warunek na minimalną długość odcinka kołowego jest spełniony, wartość $k = 219,650$ m. Wykorzystując moduł szczegółowych obliczeń programu MUGO wyliczono, że maksymalne przesunięcie układu wynosi $w_{max} = 9,34$ m, a objętość robót ziemnych $Obj = -9780,126$ m³.

Przy wyznaczaniu promienia minimalnego i minimalnej długości krzywej mu odpowiadającej najczęściej nie jest brana pod uwagę możliwość większego odsunięcia układu. Wydaje się bowiem, że większe przesunięcie osi toru niesie za sobą korzyść wynikającą wyłącznie z podwyższenia parametru prędkości maksymalnej. Szukanie rozwiązań obejmuje zatem zbiór tych z najmniejszą wartością przesunięcia. W ten sposób pomijane są rozwiązania o dużo większych promieniach i długościach krzywych przejściowych. Po wykonaniu optymalizacji z wykorzystaniem programu okazało się, że dla tak określonych danych można znaleźć rozwiązania cechujące się większą prędkością i mniejszą wartością robót ziemnych. Przykład ten wyraźnie pokazuje więc, że algorytm optymalizacyjny może odszukać rozwiązanie, które z góry zostają pominięte z uwagi na wartość przesunięcia maksymalnego.

Wszystkie wygenerowane w wyniku optymalizacji rozwiązania, przedstawione w tabeli 8.2, cechują się:

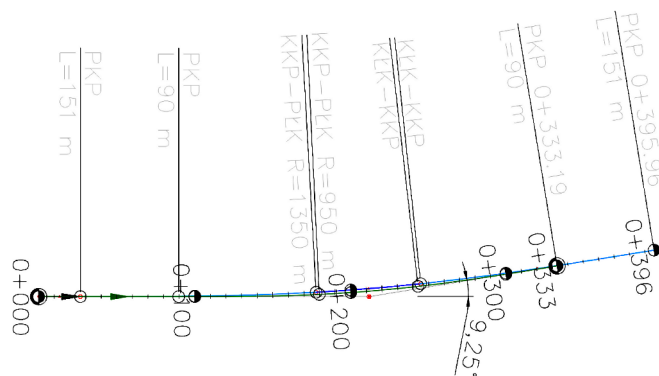
- większą prędkością nawet rzędu 50 km/h w porównaniu do rozwiązania bez optymalizacji,
- mniejszą wartością objętości robót ziemnych (niejednokrotnie nawet 9 razy mniejszą niż dla rozwiązania bez optymalizacji).

Porównanie wartości przesunięć i objętości robót ziemnych dla układu wyznaczonego tradycyjnym sposobem i wygenerowanego w programie układu nr 1 zostało przedstawione na rysunku 8.4.

8.5. Trzeci przykład obliczeniowy

Trzeci układ istniejący został określony parametrami:

- promieniem istniejącym $R = 950$ m,
- długością krzywej przejściowej istniejącej $L_i = 90$ m,
- kątem zwrotu trasy $\omega = 9,25^\circ$,
- zakładaną prędkością maksymalną $V_{max} = 160$ km/h,
- uśrednioną prędkością najwolniejszych, kursujących regularnie pojazdów kolejowych $V_t = 90$ km/h,
- obciążeniem linii ruchem towarowym $Q = 22$ Tg/rok,
- wysokością nasypu na początku istniejącej krzywej przejściowej $H = 2$ m,
- pochylenie podłużne terenu $i_{pod} = 1\%$.



Rys. 8.5. Plan sytuacyjny układu istniejącego i projektowanego bez optymalizacji dla trzeciego przypadku obliczeniowego

Ze względu na długość krzywych przejściowych prędkość maksymalna dla istniejącego układu wynosi, analogicznie jak dla drugiego przykładu, $V_{max} = 120$ km/h przy założonej prędkości podnoszenia koła na rampie $f = 28$ mm/s. Głównym ograniczeniem tego układu jest długość krzywych przejściowych, sam promień ogranicza prędkość do $V_{max} = 140$ km/h. Prędkość zaplanowana do osiągnięcia wynosi, analogicznie jak dla poprzednich przypadków, $V_{max} = 160$ km/h. Jednak z uwagi na

mniejszą wartość kąta zwrotu trasy warunek na minimalną długość części kołowej łuku nie był zachowany dla poprzednich wartości promienia i długości krzywych. Iteracyjnie sprawdzano kolejne wartości promienia i odpowiadające im najkrótsze długości krzywych (dla przechyłki minimalnej). Po wykonaniu obliczeń przyjęto projektowany promień $R_M = 1350$ m.

Dla założonego promienia $R_M = 1350$ m wyznaczana została wartość przechyłki minimalnej i maksymalnej:

$$h_{min} = \frac{11,8V_{max}^2}{R} - 153 \cdot a_{dop} = \frac{11,8 \cdot 160}{1350} - 153 \cdot 0,85 = 93,71 \approx 95 \text{ mm} \quad (8.18)$$

$$h_{max} = \frac{11,8V_t^2}{R} + 153 \cdot a_t = \frac{11,8 \cdot 90}{1350} + 153 \cdot 0,32 = 119,760 \approx 115 \text{ mm} \quad (8.19)$$

Do dalszych obliczeń przyjęto przechyłkę o wartości $h = 95$ mm. Minimalna długość krzywej przejściowej wyznaczona została z wyrażień:

$$L_{min}^{\psi} = \frac{a_{dop} \cdot V_{max}}{3,6\psi_{dop}} = \frac{0,85 \cdot 160}{3,6 \cdot 0,3} = 125,926 \approx 126 \text{ m} \quad (8.20)$$

jednocześnie wartość ta nie może być mniejsza niż:

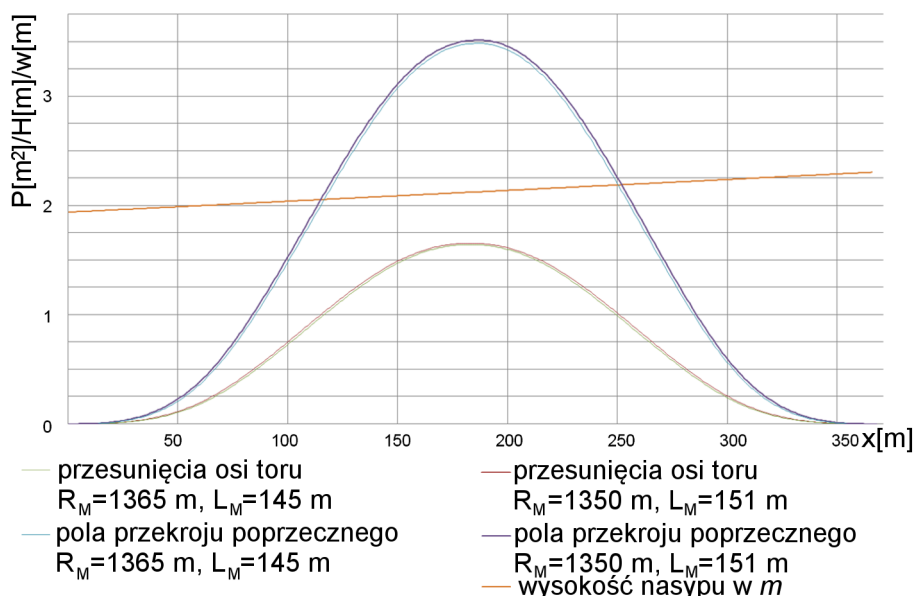
$$L_{min}^f = \frac{V_{max} \cdot h}{3,6f} = \frac{160 \cdot 95}{3,6 \cdot 28} = 150,794 \approx 151 \text{ m} \quad (8.21)$$

Ze względu na dokładność tyczenia minimalna długość krzywej przejściowej wynosi:

$$L_{min}^n = 0,7\sqrt{R_M} = 0,7\sqrt{1350} = 25,720 \approx 26 \text{ m} \quad (8.22)$$

Ostatecznie przyjęto:

- promień minimalny – projektowany $R_M = 1350$ m,
- długość krzywych przejściowych projektowanych $L_M = 151$ m,
- zastosowana przechyłka $h = 95$ mm.



Rys. 8.6. Porównanie pól przekroju poprzecznego i przesunięć osi toru dla dwóch wybranych projektowanych łuków – trzeci przykład obliczeniowy

	L_M [m]	R_M [m]	w_{max} [m]	V_{max} [km/h]	Obj [m ³]
1	155	1508	2,131458398	160	748,0457855
2	151	1448	1,927732947	160	663,5005867
3	149	1422	1,837210358	160	626,750267
4	147	1403	1,766368514	160	597,8543373
5	146	1389	1,718311675	160	579,0594128
6	145	1365	1,64226726	160	549,7784663
7	145	1366	1,645064276	160	550,7876671
8	155	1512	2,142769648	160	752,4823142
9	152	1470	1,998372748	160	691,9903662
10	152	1463	1,978638191	160	684,4253325
11	146	1379	1,690280104	160	568,5564944
12	145	1373	1,664662556	160	558,1329199

Tab. 8.3. Przykładowe rozwiązania dla trzeciego przypadku obliczeniowego

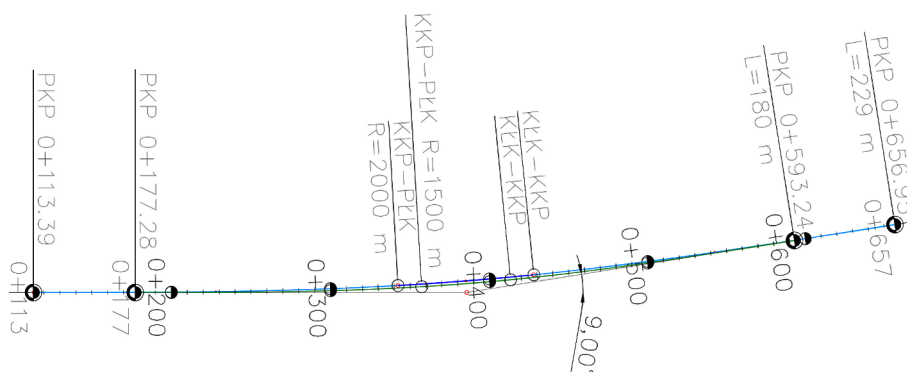
Długość odcinka kołowego wynosi $k = 67,105$ m i jest większa od wartości minimalnej $k_{min} = 64$ m. Objętość robót ziemnych $Obj = 556,364$ m³, a maksymalne przesunięcie osi toru równe jest $w_{max} = 1,655$ m. Przykładowym rozwiązaniem, dostosowanym do zakładanej prędkości, ale o mniejszym zakresie robót ziemnych, jest rozwiązanie 6 (tab.8.3). To rozwiązanie ma również mniejszą wartość przesunięcia maksymalnego $w_{max} = 1,642$ m.

8.6. Czwarty przykład obliczeniowy

Istniejący czwarty układ został określony danymi:

- promieniem istniejącym $R = 1500$ m,
- długością krzywej przejściowej istniejącej $L_t = 180$ m,
- kątem zwrotu trasy $\omega = 9^\circ$,
- wysokością nasypu na początku istniejącej krzywej przejściowej $H = 4$ m,
- zakładaną prędkością maksymalną $V_{max} = 200$ km/h,
- uśrednioną prędkością najwolniejszych, kursujących regularnie pojazdów kolejowych $V_t = 120$ km/h,
- obciążeniem linii ruchem towarowym $Q = 22$ Tg/rok,
- pochylenie podłużne terenu $i_{pod} = -7\text{‰}$.

Zgodnie z przepisami [1] na czwartym układzie można poruszać się z maksymalną prędkością równą $V_{max} = 160$ km/h, przy dopuszczalnej wartości $f = 35$ mm/s. Układ zmodernizowany musi spełniać warunki określone w przepisach [7]. Wartość promienia minimalnego dla zadanej prędkości maksymalnej i uśrednionej prędkości pociągów najwolniejszych wynosi $R_{min} = 1555,361$ m ≈ 1600 m. Dla tak przyjętego promienia nie ma możliwości zaprojektowania przechyłki zgodnej z przepisami. Promień projektowany został zatem zwiększony do wartości, w której zakres przechyłek jest zgodny z obowiązującymi zasadami [1, 7]. Wartość promienia wyniosła $R_M = 1700$ m, zaprojektowano przechyłkę $h = 150$ mm i odpowiadające jej krzywe



Rys. 8.7. Plan sytuacyjny układu istniejącego i projektowanego bez optymalizacji dla czwartego przypadku obliczeniowego

przejsiowe $L_M = 300$ m. Dla danego kąta zwrotu trasy parametry te nie zapewniają spełnienia warunku na minimalną długość części kołowej łuku. Należy więc – odpowiednio zwiększając promień – znaleźć wartość, która zapewni spełnienie tego warunku. Najmniejszy promień spełniający to założenie wynosi $R_M = 2000$ m.

Dla założonego promienia $R_M = 2000$ m wyznaczana została wartość przechyłki minimalnej i maksymalnej:

$$h_{min} = \frac{11,8V_{max}^2}{R} - 153 \cdot a_{dop} = \frac{11,8 \cdot 200}{2000} - 153 \cdot 0,85 = 105,95 \approx 110 \text{ mm} \quad (8.23)$$

$$h_{max} = \frac{11,8V_t^2}{R} + 153 \cdot a_t = \frac{11,8 \cdot 120}{2000} + 153 \cdot 0,32 = 133,92 \approx 130 \text{ mm} \quad (8.24)$$

Do dalszych obliczeń przyjęto przechyłkę o wartości $h = 115$ mm (aby zapewnić spełnienie warunku na minimalną długość części kołowej łuku). Minimalna długość krzywej przejściowej wyznaczona została z wyrażeń:

$$L_{min}^{\psi} = \frac{a_{dop} \cdot V_{max}}{3,6\psi_{dop}} = \frac{0,85 \cdot 200}{3,6 \cdot 0,3} = 157,407 \approx 158 \text{ m} \quad (8.25)$$

jednocześnie wartość ta nie może być mniejsza niż:

$$L_{min}^f = \frac{V_{max} \cdot h}{3,6f} = \frac{200 \cdot 95}{3,6 \cdot 28} = 228,175 \approx 229 \text{ m} \quad (8.26)$$

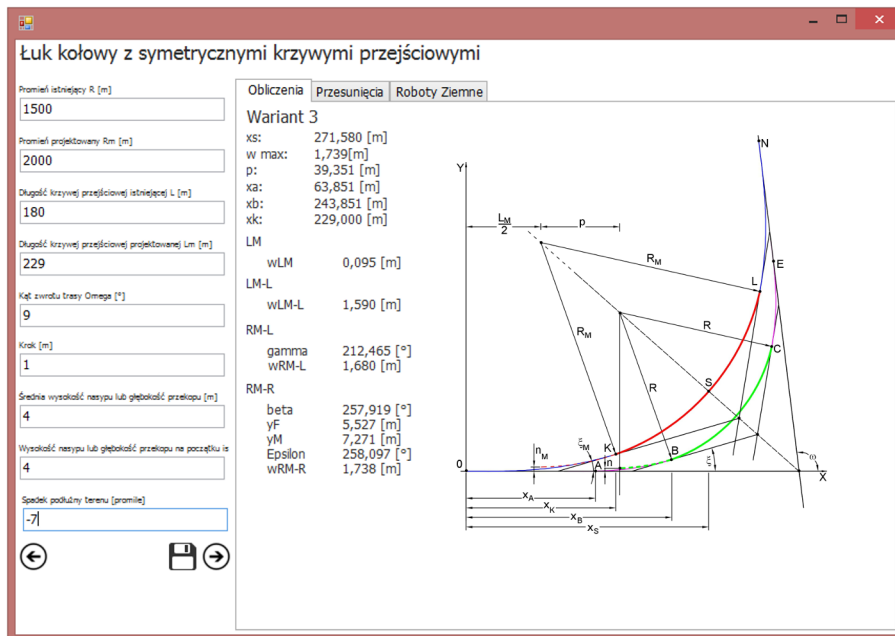
Ze względu na dokładność tyczenia minimalna długość krzywej przejściowej wynosi:

$$L_{min}^n = 0,7\sqrt{R_M} = 0,7\sqrt{2000} = 31,305 \approx 32 \text{ m} \quad (8.27)$$

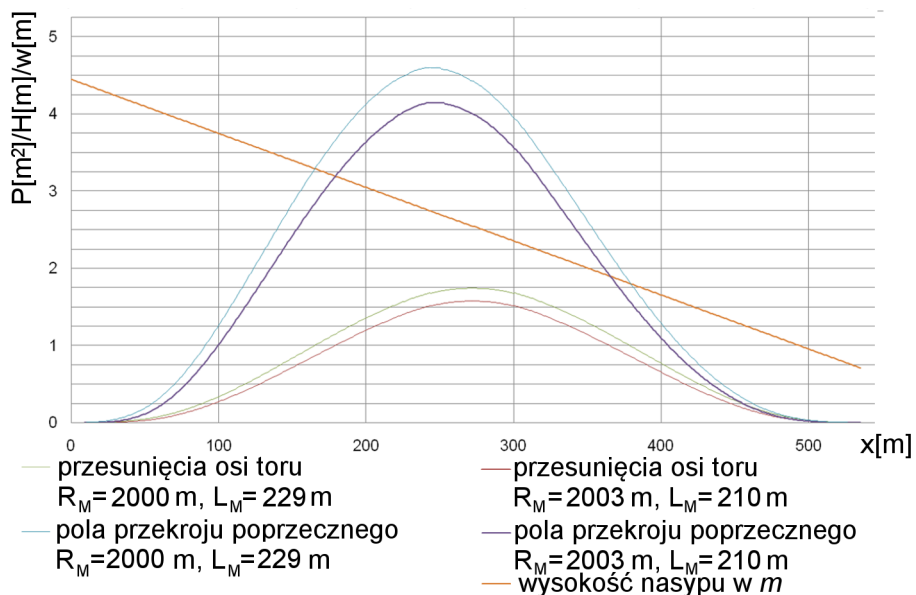
Ostatecznie przyjęto:

- promień minimalny – projektowany $R_M = 2000$ m,
- długość krzywych przejściowych projektowanych $L_M = 229$ m,
- zastosowana przechyłka $h = 115$ mm.

Tak zaprojektowany układ spełnia warunek na minimalną długość części kołowej łuku $k_{min} = 80$ m. Długość odcinka kołowego łuku wynosi $k = 85,408$ m.



Rys. 8.8. Widok okna programu w module obliczeń szczegółowych programu MUGO – rozwiązanie dla czwartego przypadku obliczeniowego – łuk projektowany metodą bez optymalizacji



Rys. 8.9. Porównanie pól przekroju poprzecznego i przesunięć osi toru dla dwóch wybranych projektowanych łuków – czwarty przykład obliczeniowy

	L_M [m]	R_M [m]	w_{max} [m]	V_{max} [km/h]	Obj [m ³]
1	211	2020	1,62628067	200	963,0950527
2	211	2052	1,62628067	200	963,0950527
3	210	2001	1,567482294	200	924,3751809
4	210	2002	1,570115806	200	926,2358874
5	210	2004	1,575384203	200	929,9611223
6	210	2006	1,580654426	200	933,6914503
7	210	2009	1,588563174	200	939,3228144
8	210	2003	1,572749776	200	928,097868

Tab. 8.4. Przykładowe rozwiązania dla czwartego przypadku obliczeniowego

W module obliczeń szczegółowych programu MUGO wyznaczono wartość wartość przesunięcia osi toru równą $w_{max} = 1,739$ m i objętość robót ziemnych $Obj = 1058,897$ m³ (rys. 8.8).

W przykładzie czwartym wszystkie przykładowo prezentowane w tabeli 8.4 układy cechują się mniejszą wartością objętości robót ziemnych przy jednoczesnym spełnieniu warunku wymaganej prędkości maksymalnej.

8.7. Piąty przykład obliczeniowy

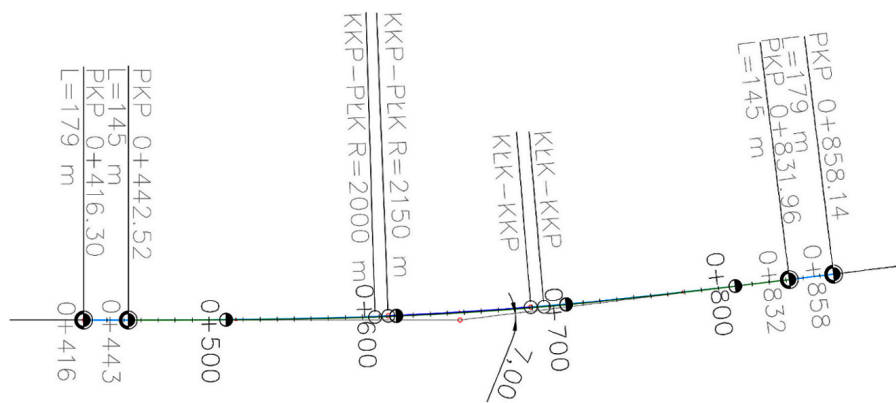
Ostatni piąty przypadek został określony danymi:

- promieniem istniejącym $R = 2000$ m,
- długością krzywej przejściowej istniejącej $L_i = 145$ m,
- kątem zwrotu trasy $\omega = 7^\circ$,
- zakładaną prędkością maksymalną $V_{max} = 200$ km/h,
- uśrednioną prędkością najwolniejszych, kursujących regularnie pojazdów kolejowych $V_t = 120$ km/h,
- obciążeniem linii ruchem towarowym $Q = 22$ Tg/rok,
- wysokością nasypu na początku istniejącej krzywej przejściowej $H = -2$ m,
- pochylenie podłużne terenu $i_{pod} = 1,6\%$.

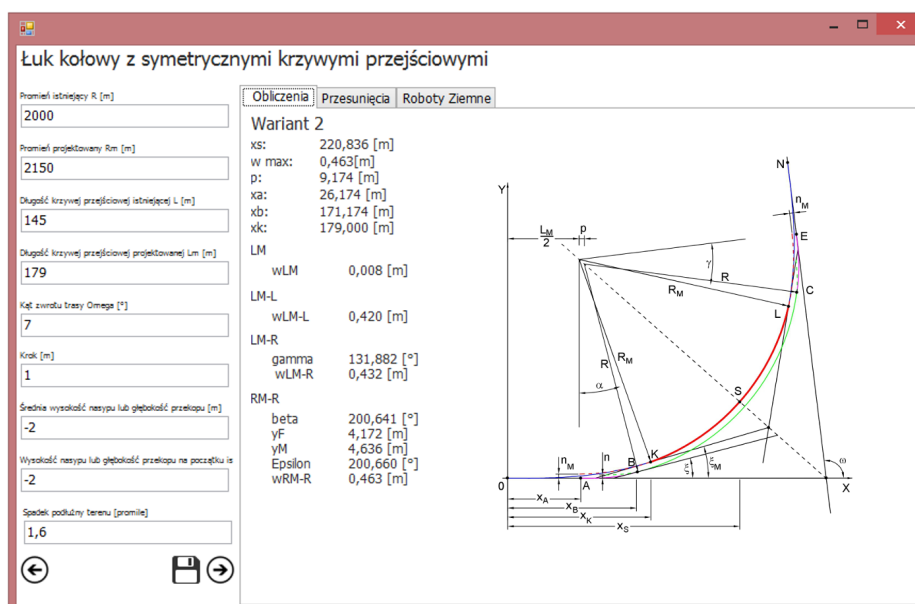
Zgodnie z przepisami [1] na takim układzie przy $f = 35$ mm/s można poruszać się z maksymalną prędkością $V_{max} = 180$ km/h. Zaprojektowany minimalny promień dla tego przypadku wynosi $R_M = 2150$ m, przechyłka $h = 90$ mm, a długości krzywych przejściowych $L_M = 179$ m. Dla założonego promienia $R_M = 2000$ m wyznaczana została wartość przechyłka minimalnej i maksymalnej:

$$h_{min} = \frac{11,8V_{max}^2}{R} - 153 \cdot a_{dop} = \frac{11,8 \cdot 200}{2150} - 153 \cdot 0,85 = 89,485 \approx 90 \text{ mm} \quad (8.28)$$

$$h_{max} = \frac{11,8V_t^2}{R} + 153 \cdot a_t = \frac{11,8 \cdot 120}{2150} + 153 \cdot 0,32 = 127,993 \approx 125 \text{ mm} \quad (8.29)$$



Rys. 8.10. Plan sytuacyjny układu istniejącego i projektowanego bez optymalizacji dla piątego przypadku obliczeniowego



Rys. 8.11. Widok okna programu w module obliczeń szczegółowych programu MUGO – rozwiązanie dla piątego przypadku obliczeniowego – łuk projektowany metodą bez optymalizacji

Do dalszych obliczeń przyjęto przechyłkę o wartości $h = 90$ mm. Minimalna długość krzywej przejściowej wyznaczona została z wyrażen:

$$L_{min}^{\psi} = \frac{a_{dop} \cdot V_{max}}{3,6\psi_{dop}} = \frac{0,85 \cdot 200}{3,6 \cdot 0,3} = 157,407 \approx 158 \text{ m} \quad (8.30)$$

jednocześnie wartość ta nie może być mniejsza niż:

$$L_{min}^f = \frac{V_{max} \cdot h}{3,6f} = \frac{200 \cdot 95}{3,6 \cdot 28} = 178,571 \approx 179 \text{ m} \quad (8.31)$$

	L_M [m]	R_M [m]	w_{max} [m]	V_{max} [km/h]	Obj [m ³]
1	189	2120	0,488285293	200	-191,257169
2	189	2205	0,620060013	200	-238,9635708
3	189	2206	0,621622717	200	-239,549319
4	189	2207	0,623185697	200	-240,135376
5	190	2213	0,639705247	200	-246,8205558
6	190	2215	0,6428289	200	-247,9973646
7	190	2216	0,644391142	200	-248,5862318
8	230	2440	1,287548466	220	-528,8237575
9	231	2446	1,304397649	220	-537,043853
10	217	2676	1,558411044	220	-635,4521094
11	217	2677	1,560005842	220	-635,5792975
12	217	2678	1,561600845	220	-636,3092386
13	217	2679	1,563196053	220	-637,0394797
14	217	2680	1,564791464	220	-637,7700209
15	218	2685	1,579522041	220	-644,8798736
16	218	2691	1,589089811	220	-649,2795638
17	246	2677	1,768992892	230	-751,8896815
18	247	2683	1,785754844	230	-760,2155425

Tab. 8.5. Przykładowe rozwiązania dla piątego przypadku obliczeniowego

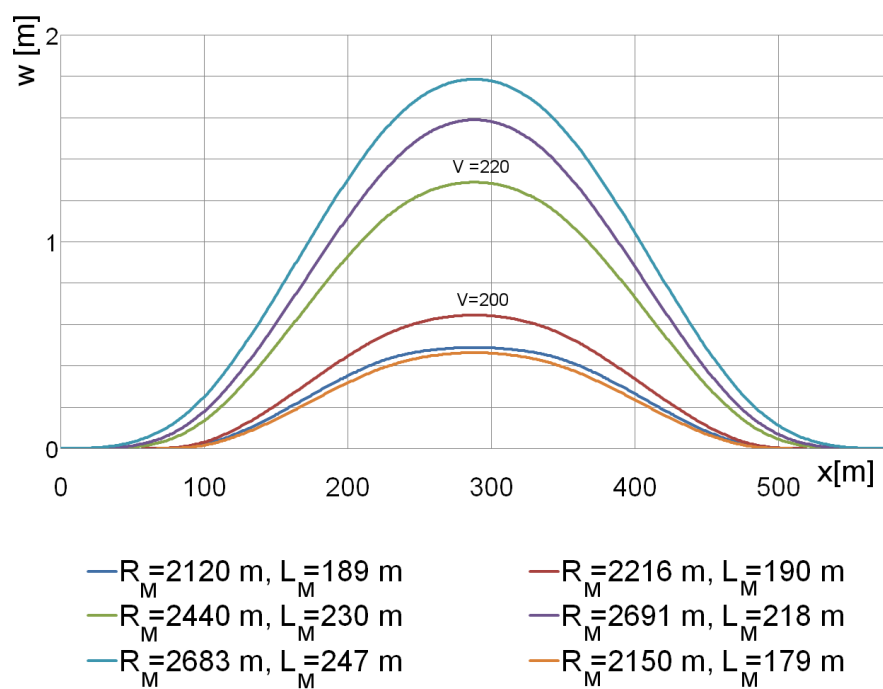
Ze względu na dokładność tyczenia minimalna długość krzywej przejściowej wynosi:

$$L_{min}^n = 0,7\sqrt{R_M} = 0,7\sqrt{2150} = 32,457 \approx 33 \text{ m} \quad (8.32)$$

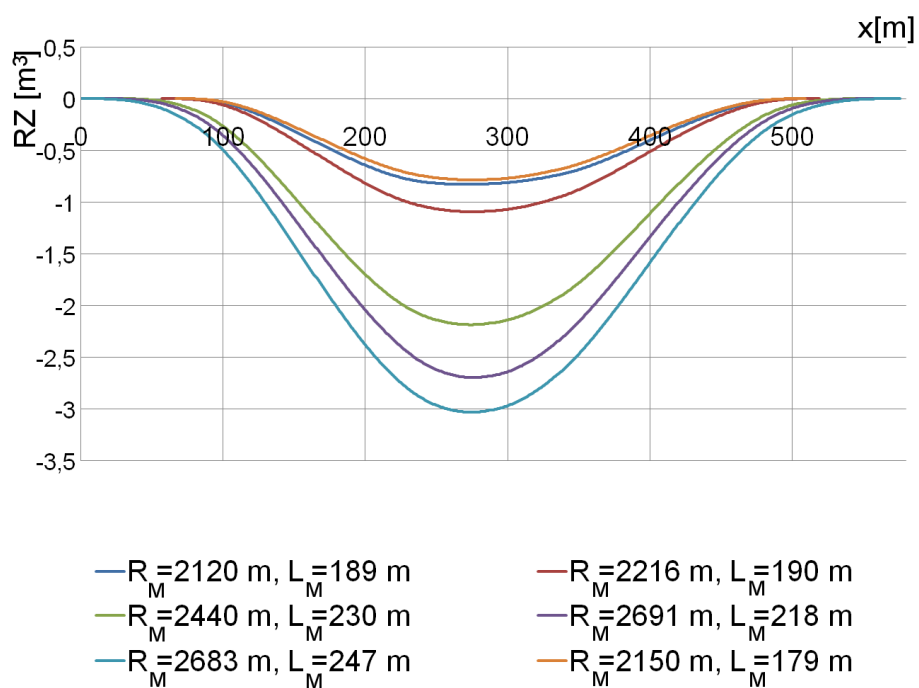
Ostatecznie przyjęto:

- promień minimalny – projektowany $R_M = 2150 \text{ m}$,
- długość krzywych przejściowych projektowanych $L_M = 179 \text{ m}$,
- zastosowana przechyłka $h = 90 \text{ mm}$.

Dla tak zaprojektowanego układu długość części kołowej łuku $k = 83,775 \text{ m}$ i jest większa od minimalnej $k_{min} = 80 \text{ m}$. Plan sytuacyjny układu istniejącego i projektowanego przedstawia rysunek 8.10 Porównanie układu istniejącego z projektowanym przy wykorzystaniu modułu obliczeń szczegółowych programu MUGO (rys. 8.11) wykazało, że maksymalne przesunięcie osi toru wynosi $w_{max} = 0,463 \text{ m}$ a wartość objętości robót ziemnych jest równa $Obj = -175,404 \text{ m}^3$. Przykładowe rozwiązania prezentowane w tabeli 8.5 pokazują, że dla takiego przypadku w danych warunkach terenowych można, korzystając jeszcze z istniejących budowli ziemnych, zwiększyć proponowaną prędkość np. do $V_{max} = 220 \text{ km/h}$ projektując układ nr 8 (tab. 8.5). Maksymalne przesunięcie osi toru wyniosłoby $w_{max} = 1,287 \text{ m}$, a objętość robót ziemnych $Obj = -528,823 \text{ m}^3$. Porównanie wyników przykładowych układów wygenerowanych w procesie optymalizacji i układu zaprojektowanego bez optymalizacji zostało przedstawione na rysunkach 8.12 i 8.13. Inne przykłady obliczeniowe z wykorzystaniem programu MUGO zostały przedstawione w opracowaniu [119].



Rys. 8.12. Porównanie przesunięć osi toru dla wybranych projektowanych łuków – piąty przykład obliczeniowy



Rys. 8.13. Porównanie objętości robót ziemnych dla wybranych projektowanych łuków – 5 przykład obliczeniowy

8.8. Podsumowanie weryfikacji

W pracy przedstawiono pięć różnych istniejących układów geometrycznych toru. Każdy z nich wymagał przeprojektowania, ponieważ nie spełniał podstawowego założenia, jakim była możliwość przejazdu z zaprojektowaną prędkością maksymalną. Na początku etapu weryfikacji obliczono minimalne parametry geometryczne i na ich podstawie stworzono warianty projektowe – bez optymalizacji. Następnie dane układu istniejącego zostały wprowadzone do programu MUGO (modułu optymalizacyjnego), za pomocą którego wygenerowano nowe warianty projektowe. Przykładowe rozwiązania zostały przedstawione w poszczególnych podrozdziałach. Porównano rozwiązania z programu i te obliczone bez optymalizacji.

W każdym z rozpatrywanych przypadków wśród układów geometrycznych wygenerowanych na drodze optymalizacji można było odnaleźć rozwiązania, które z punktu widzenia trzech przyjętych kryteriów uznano za lepsze. Zaobserwowano, że jakość generowanych rozwiązań zależała przede wszystkim od skomplikowania tych układów i ukształtowania terenu. Nieraz rozwiązania te omijały sąsiedztwo układu istniejącego, a mimo tego cechowały się większymi wartościami prędkości maksymalnej i mniejszymi objętościami robót ziemnych. W niektórych przypadkach odnaleziono rozwiązania, które spełniały wszystkie kryteria a wartość maksymalnego przesunięcia osi toru projektowanego od istniejącego była mniejsza niż dla układu bez optymalizacji.

Podsumowując, na podstawie analizy wielu przypadków (z których w pracy zaprezentowano pięć) znaleziono rozwiązania lepsze od tych projektowanych metodami klasycznymi. Stworzona metoda może być zatem pomocna przy generowaniu i ocenie wariantów projektowych przebudowywanych układów geometrycznych toru kolejowego.

Zakończenie

Tematyka poruszona w niniejszej pracy dotyczy zagadnienia projektowania modernizacji układów geometrycznych linii kolejowych. Jak wykazano, modernizacja linii kolejowych jest złożonym przedsięwzięciem budowlanym. Na początku tego procesu tworzone są koncepcje wariantów, które powinny podlegać ocenie w gronie eksperckim. Taki sposób postępowania ma na celu zmniejszenie ryzyka popełnienia błędów decyzyjnych odnośnie danej inwestycji. Oceny wariantów przebiegu trasy dokonywać powinno się przy uwzględnieniu czynników wpływających na jakość planowanej inwestycji oraz na aspekty ekonomiczne związane z kosztami i czasem realizacji. Zatem wybór rozwiązania poprzedzany jest licznymi analizami wielokryterialnymi. Aktualnie proces projektowania wspomagany jest przez profesjonalne programy komputerowe, które umożliwiają automatyczne generowanie układów geometrycznych trasy kolejowej w odniesieniu do cyfrowych modeli terenu. Wspomaganie pracy projektanta polega głównie na wykonywaniu obliczeń oraz na prezentacji graficznej danego wariantu przebiegu trasy. W dalszym ciągu pozostaje jednak problem oceny układu geometrycznego. Rozwiązanie takiego zadania wymaga zatem zastosowania nowej metody z użyciem optymalizacji wielokryterialnej.

Dodatkowym aspektem odróżniającym projektowanie modernizacji od projektowania nowych linii kolejowych jest konieczność nawiązywania się do istniejącej linii, co narzuca projektantowi konieczność spełnienia dodatkowego kryterium, chociażby w postaci minimalizacji przesunięć osi toru. Co prawda, w niektórych sytuacjach niewielka zmiana istniejącego układu pozwala na zachowanie istniejących budowli ziemnych. Jednak w praktyce, projektowanie z zachowaniem wszystkich warunków ograniczających (głównie problem dostępności terenu) nie pozwala na wykonanie efektywnego projektu modernizacji. Przykładem odejścia od kryterium minimalnych przesunięć mogą być liczne inwestycje drogowe, kiedy to przebieg nowej trasy w znacznej mierze przebiega, a w nowym układzie geometrycznym, a pierwotna droga nie zostaje wyłączona z eksploatacji zwiększając tym samym lokalną przepustowość. Zatem zadanie określenia kryteriów w procesie modernizacji oraz późniejsze wskazanie rozwiązania optymalnego jest zadaniem kluczowym na etapie planowania.

W pracy przedstawiono autorską metodę wielokryterialnej oceny wspomagającą proces projektowania modernizacji linii kolejowych. W związku ze złożonością omawianego zagadnienia dokonano wyboru najistotniejszych kryteriów uwzględnianych w procesie optymalizacji. Uwzględniono specyfikę związaną z przebudową układów geometrycznych toru i jako jedno z kryteriów przyjęto przesunięcia osi toru i związanym z nimi zakresem koniecznych do wykonania robót ziemnych. Drugim czynnikiem było określenie kosztu cyklu życia szyn kolejowych, z uwzględnieniem zużycia bocznego występującego na łukach kołowych. Jako trzecie kryterium wybrano prędkość maksymalną możliwą do osiągnięcia na projektowanym układzie.

Do rozwiązania zadania optymalizacyjnego wybrano jedną z wielu metod meta-heurystycznego przeszukiwania, tj. algorytmy genetyczne. Niemniej jednak, rozwiązanie problemu optymalizacyjnego wymagało stworzenia autorskiego algorytmu, w którym uwzględnione zostały wymagania dotyczące projektowania układów geometrycznych toru. Na podstawie licznie przeprowadzonych analiz zdefiniowano funkcję celu zawierającą wybrane kryteria z uwzględnieniem wag poszczególnych parametrów.

Praca zawiera również autorski program komputerowy napisany w języku C#. Skupiono się na jego funkcjonalności w kwestii wspomaganie pracy projektanta. Program podzielono na dwa moduły obliczeniowe. Pierwszy moduł wyznacza przesunięcia osi toru, charakterystyczne punkty układów geometrycznych i zakres robót ziemnych dla różnych przypadków układów geometrycznych istniejących i projektowanych. Drugi moduł jest narzędziem optymalizacyjnym, w którym tworzone są i oceniane różne warianty projektowe.

Analizy przypadków wykazały, że stosowane metody projektowania – często ograniczające się do zastosowania minimalnych wartości parametrów – mogą okazać się mniej korzystne z uwagi na przyjęte kryteria. Co prawda dla najprostszych przypadków, w których linia przebiega w terenie płaskim, metody te mogą okazać się wystarczające. Jednak w przypadku większego zróżnicowania terenu pomijają wiele aspektów, które w konsekwencji mogą spowodować wzrost kosztu inwestycji. W wielu rozpatrywanych przypadkach zastosowanie algorytmu wielokryterialnej oceny umożliwiło odnalezienie rozwiązania lepszego (z punktu widzenia przyjętych kryteriów). Można więc przyznać, że stosowanie nowoczesnych algorytmów optymalizacyjnych stanowi efektywną metodę wspomagającą projektowanie i ocenę wariantów w procesie modernizacji linii kolejowych.

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), 1998.
- [2] ČSN -EN 60300-3-3: Management spolehlivosti - Část 3-3: Pokyn k použití - Analýza nákladů životního cyklu, 2005.
- [3] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/57/WE z dnia 17 czerwca 2008 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei we Wspólnocie, 2008.
- [4] European Standard EN 13803-1: Railway applications - track - track alignment desing parameters - track gauges 1435 mm and wider part 1: plain line, 2009.
- [5] PN-EN 13803-1: 2010: Kolejnictwo -Tor -Parametry projektowania toru w planie - Tor o szerokości 1435 mm i większej Część 1: Szlak, 2010.
- [6] Rozporządzenie Komisji (UE) Nr 1299/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. dotyczące technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Infrastruktura” systemu kolei w Unii Europejskiej, 2014.
- [7] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie. (Dz. U. 2014 poz. 867 z dnia 5 czerwca 2014 roku), 2014.
- [8] Katalog cen robót kolejowych i tramwajowych, 2015.
- [9] Ali A.F., Hassanien A.E., A Survey of Metaheuristic Methods for Bioinformatics Applications, Springer, 2016.
- [10] Andreev A., Komarov K., Karpušenko I., *Iznos relsov i koles podvižnogo sostava*, *Železnodorožnyj Transport*, 7, 1997.
- [11] Arabas J., Wykłady z algorytmów ewolucyjnych, WNT, Warszawa, 2001.
- [12] Bajer C., *Numeryczne modelowanie czasoprzestrzenne dynamicznych zagadnień kontaktowych*, Praca IPPT, 2001.
- [13] Basiewicz T., Rudziński L., Jacyna M., *Linie kolejowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2002.
- [14] Bałuch H., *Wyznaczanie geometrycznych charakterystyk szyn do obliczeń ich wytrzymałości*, *Przegląd Kolejowy Drogowy*, (11), 1957.
- [15] Bałuch H., *Trwałość i niezawodność eksploatacyjna nawierzchni kolejowej*, WKŁ, Warszawa, 1980.
- [16] Bałuch H., *Optymalizacja układów geometrycznych toru*, WKŁ, Warszawa, 1983.
- [17] Bałuch H., *Układy geometryczne połączeń torów*, WKŁ, Warszawa, 1989.
- [18] Bałuch H., *Wybrane zagadnienia trwałości i niezawodności szyn kolejowych*, III Ogólnopolska Konferencja Naukowo Techniczna – Spawalnictwo Dróg Szynowych, 2007.
- [19] Bałuch H., Bałuch M., *Eksploatacyjne możliwości wydłużenia cykli wymian szyn w lukach o małych promieniach*, *Problemy Kolejnictwa*, (132), 2000.
- [20] Bałuch H., Bałuch M., *Układy geometryczne toru i ich deformacje*, KOW, Warszawa, 2010.

- [21] Bałuch M., *Analiza kryteriów dopuszczalnego bocznego zużycia szyn*, Drogi Kolejowe, (10), 1978.
- [22] Bałuch M., *Metoda kształtowania warstwowych układów geometrycznych toru*, 480, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej Seria Budownictwo Lądowe XLVIII wyd., 1992.
- [23] Bałuch M., *Dobór wartości kinematycznych w projektowaniu modernizacji linii kolejowych*, Problemy Kolejnictwa, (119), 1995.
- [24] Bałuch M., *Pozorne i rzeczywiste przyczyny nadmiernego zużycia szyn w tokach wewnętrznych łuków*, Piąte Seminarium Diagnostyki Nawierzchni Szynowych, 89–100, Gdańsk, 2003.
- [25] Bałuch M., *Interpretacja pomiarów i obserwacji nawierzchni kolejowej*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Gdańsk, 2005.
- [26] Bałuch M., *The assesment of changes of track geometrical layout in the process of feasibility studies of railways modernization*, Archives of Civil Engineering, (4), 2006.
- [27] Bałuch M., Szwaczekiewicz K., *Modernizacja łuków koszowych z wykorzystaniem programu MUGO*, Miesięcznik naukowo-techniczny Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP Przegląd Komunikacyjny, (9-10), 2011.
- [28] Bereta M., Burczyński T., *Comparing binary and real-valued coding in hybrid immune algorithm for feature selection and classification of ecg signals*, Eng. Appl. Artif. Intell., 20(5), 571–585, 2007.
- [29] Birrman F., *20 Jahre Betriebserfahrungen mit verschleißfesten Schienen*, Eisenbahnbau, Frankfurt, 1949.
- [30] Blum C., Roli A., Alba E., *An Introduction to Metaheuristic Techniques*, John Wiley and Sons, Inc., 2005.
- [31] Bogacz R., Bajer C., *On modelling of contact problems in railway engineering*, Praca IPPT, 1997.
- [32] Bogdaniuk B., *Modernizacja dróg kolejowych przy ich elektryfikacji*, WKŁ, Warszawa, 1988.
- [33] Bogdaniuk B., Towpik K., *Budowa, modernizacja i naprawy dróg kolejowych*, KOW, Warszawa, 2010.
- [34] Bogdański S., Olzak M., Stupiński J., *Numerical stress analysis of rail rolling contact fatigue cracks*, Wear, 191, 14–24, 1996.
- [35] Borghagen L., Brinkhagen L., *LCC Procurement at the Swedish State Railways*, Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, IEEE, 1984.
- [36] Box G.E., *Evolutionary operation: A method for increasing industrial productivity*, Appl. Statistics, VI(2), 1957.
- [37] Bremerman H.J., *Optimization through evolution and recombination*, Self Organizing Systems, 1962.
- [38] Brzywczy E., *Tradycyjne metody optymalizacji a nowoczesna heurystyka w wybranych zagadnieniach modelowania robót górniczych w kopalniach węgla kamiennego*, Gospodarka surowcami mineralnymi, 24, 2008.
- [39] Černý V., *Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm*, Journal of Optimization Theory and Applications, 45(1), 41–51, 1985.
- [40] Dersin P., Dupre D., Schiwiek L., Gosnet H.L.J., Schneider M., *Guidelines for Life Cycle Cost: Volume II Terms and Definitions for Total Railway Systems*, 2001.
- [41] Dorigo M., *Optimization, learning and natural algorithms*, Rozprawa doktorska, Politecnico di Milano, Milano, 1992.
- [42] Dorigo M., Birattari M., Stutzle T., *Ant colony optimization*, Computational Intelligence Magazine, IEEE, 1(4), 2006.
- [43] Drabik L., Sobol E., *Słownik Języka Polskiego*, PWN, Warszawa, 2014.

- [44] Dukkipati R., Amjot J., *Computer aided simulation in railway dynamics*, Marcel Dekker Inc., 1985.
- [45] Fleszar K., Hindi K.S., *Solving the resource-constrained project scheduling problem by a variable neighbourhood search*, *European Journal of Operational Research*, 155(2), 2004.
- [46] Friedberg R.M., *A learning machine: Part 1*, *IBM*, 2(1), 1958.
- [47] Friedberg R.M., *A Genetic Algorithm for the Linear Transportation Problem*, *IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics*, 21(2), 1991.
- [48] Gendreau M., Hertz A., Laporte G., *A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem*, *Management Science*, 40(10), 1276–1290, 1994.
- [49] Glover F., *The general employee scheduling problem: an integration of management science and artificial intelligence*, *Computers and Operation Research*, (15), 563–593, 1986.
- [50] Glover F., *Artificial Evolution: Third European Conference AE '97 Nîmes, France, October 22–24, 1997 Selected Papers*, rozdz. A template for scatter search and path relinking, 1–51, Springer Berlin Heidelberg, Berlin Heidelberg, 1998.
- [51] Glover F., Laguna M., *Tabu Search*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, 1997.
- [52] Goldberg D.E., *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania*, WNT, Warszawa, 1995.
- [53] Grabowski R., *Rampa przechyłkowa na gładkiej krzywej przejściowej*, *Drogi Kolejowe*, (4-5), 1985.
- [54] Grodzicki S., *Geometria tras - algorytmy obliczeń, komputerowo wspomagane projektowanie*, WKŁ, Warszawa, 1987.
- [55] Gaşowski W., Sobaś J., *Model dynamiki pojazdu szynowego przy zastosowaniu zawieszania aktywnego i symulacja komputerowa przyspieszeń poziomych lokomotywy*, *Pojazdy Szynowe*, 2, 1999.
- [56] Hansen P., Mladenović N., *Meta-Heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization*, rozdz. An Introduction to Variable Neighborhood Search, 433–458, Springer US, Boston, MA, 1999.
- [57] Hansen P., Mladenović N., *Variable neighborhood search*, Kluwer Academic Publisher, 2003.
- [58] Holland J.H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, 1975.
- [59] *INNOTRACK Integrated Project (IP) Thematic Priority 6: Sustainable Development, Global Change and Ecosystems, Deliverable report -D4.1.4 Rail Degradation Algorithms*, Corus Rail and voestalpine Schienen, 2009.
- [60] *INNOTRACK Integrated Project (IP) Thematic Priority 6: Sustainable Development, Global Change and Ecosystems, Deliverable report - d.4.1.5GL Definitive guidelines on the use of different rail grades*, Corus Rail and voestalpine Schienen, 2009.
- [61] Kennedy J., Eberhart R., *Particle swarm optimization*, *Neural Networks*, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on, tom 4, 1995.
- [62] Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M.P., *Optimization by simulated annealing*, *Science*, 220, 1983.
- [63] Kjellsson U., *From X2000 to Crusaris Regina: Development of LCC technology*, *World Congress on Railroad Research*, 1993.
- [64] Kjellsson U., Hagemann O., *UNIFE Unilife and UNIFE Unidata the first european Life Cycle Cost interface software model*, *Research Report*, 2000.
- [65] Koc W., *Elementy teorii projektowania układów torowych*, Wydawnictwo PG, Gdańsk, 2004.
- [66] Koc W., Chrostowski P., Palikowska K., Szwaczkiewicz K., *Analityczna weryfikacja wybranego układu geometrycznego toru z wykorzystaniem profesjonalnego programu CAD*, *Przegląd Komunikacyjny*, (8), 2015.

- [67] Koc W., Mieloszyk E., *Badania procesu zużywania się szyn w łukach SKM*, V Krajowa Konferencja Naukowa Drogi Kolejowe, 1989.
- [68] Koc W., Mieloszyk E., *Structural model of rails' side wear in curves*, The Seventh International Conference RAILWAY ENGINEERING, 2004.
- [69] Koc W., Radomski R., *Analiza celowości stosowania krzywych przejściowych z nieliniowymi rampami przechyłkowymi na liniach kolejowych w Polsce*, Budownictwo Lądowe XLIII, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, 1987.
- [70] Koc W., Wilk A., Grulkowski S., Dobrowolski P., Kustro G., *Modelowanie bocznego zużycia bocznego szyn w łukach linii SKM*, Szóste Seminarium Diagnostyki Nawierzchni Szynowych, 117–128, 2004.
- [71] Korzeniowski B., *Powstanie i ewolucja życia*, EREM FOSZE, Kraków, 2009.
- [72] Kosmol J., Wilk P., *Próba optymalizacji korpusu obrabiarki z zastosowaniem MES i algorytmu genetycznego*, Modelowanie inżynierskie 35, 35, 2008.
- [73] Kotowski S., *Analiza algorytmów genetycznych, jako układów dynamicznych*, Rozprawa doktorska, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa, 2008.
- [74] Kowalska-Pyzalska A., *Możliwości zastosowania algorytmów metaheurystycznych do optymalizacji przyłączenia rozproszonych źródeł energii do sieci elektroenergetycznej*, HSC Research Report, 2007.
- [75] Koza J.R., *Genetic Programming*, MIT Press, 1992.
- [76] Kwaśnicki W., *Ekonomia ewolucyjna- alternatywne spojrzenie na proces rozwoju gospodarczego*, 1996.
- [77] Kędra Z., Szwaczkiewicz K., *Obliczanie przesunięć osi toru przy modernizacji układów geometrycznych*, Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie, (2(101)), 2013.
- [78] Laguna M., Martí R., *Scatter Search: Methodology and Implementations in C*, Operations Research/Computer Science Interfaces Series, Springer, 2012.
- [79] Lewis R., Olofsson U., *Mapping rail wear regimes and transitions*, Wear, 257, 2004.
- [80] Lourenço H.R., Martin O.C., Stützle T., *Iterated Local Search*, Kluwer Academic Publisher, 2003.
- [81] Michalewicz Z., *Evolutionary computation*, Statistics and Computing, 1994.
- [82] Michalewicz Z., *Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne*, WNT, Warszawa, 1997.
- [83] Michalewicz Z., Fogel D.B., *How to Solve it: modern Heuristics*, Springer, 2000.
- [84] Michalewicz Z., Schmidt M., *Evolutionary Algorithms and Constrained optimization*, R. Sarker, M. Mohammadian, X. Yao, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [85] Mladenović N., Hansen P., *Variable neighborhood search*, Comput. Oper. Res., 24(11), 1997.
- [86] Nowakowski M., *Korygowanie krzywych przejściowych metodą Helmerta*, Drogi Kolejowe, 12, 1985.
- [87] Ortanek P., *Hybrid evolutionary algorithm in optimization of structures under dynamical loads*, 2002, iUTAM Symposium on Evolutionary Methods in Mechanics.
- [88] Palikowska K., *Projektowanie układów geometrycznych toru kolejowego z zastosowaniem programowania ewolucyjnego*, Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, 2002.
- [89] Pankau R., *Optymalne projektowanie układów ramowych z uwzględnieniem problemów stateczności*, Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, 2010.
- [90] Parpinelli R., H. S. Lopes A.A.F., *Data mining with an ant colony optimization algorithm*, Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, 6(4), 2002.

- [91] Podolski M., *Analiza nowych zastosowań teorii szeregowania zadań w organizacji robót budowlanych*, Rozprawa doktorska, Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2008.
- [92] Povilaitiene I., Kamaitis I.Z., Podagelis I., *Influence of gauge width on rail side wear on track curves*, Journal of civil engineering and management, XII(3), 2006.
- [93] Povilaitiene I., Laurinavičius A., *Reduction of external rail wear on road curves*, Journal of civil engineering and management, X(2), 2004.
- [94] Radomski R., *Trwałość szyn kolejowych w warunkach eksploatacyjnych PKP*, Jubileuszowa sesja Katedry Inżynierii Kolejowej, 1994.
- [95] Rasheed F., Programmer's Heaven C# School, Synchron Data S.L, 2006.
- [96] Rechenberg I., *Evolutionsstrategie – Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*, Fommann-Holzboog, 1973.
- [97] Romaszkiwicz T., *Ocena nośności konstrukcji zadaszona stadionu pge arena w gdańsku*, Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, 2012.
- [98] Roviraa A., Rodaa A., Marshallb M., Brunskillb H., Lewis R., *Experimental and numerical modelling of wheel -rail contact and wear*, Wear, 271, 2011.
- [99] Rudy J., Żelazny D., *Przeszukiwanie lokalne i algorytmy populacyjne dla wielokryterialnego problemu gniazdowego*, Krajowa Konferencja Automatyzacji Procesów Dyskretnych, Gliwice : Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, 2014.
- [100] Ruman F, Grenèik J., *LCC and LCP analysis of rail vehicles*, Logistyka, (3/2014), 2014.
- [101] Sadeghi J., Akbari B., *Field investigation on effects of railway track geometric parameters on rail wear*, Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 7(11), 2006.
- [102] Schramm G., *Obrebautechnik und Oberbauwirtschaft*, Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Darmstadt, 1960.
- [103] Schwefel H.P., *Numerical Optimization of Computer Models*, Birkhäuser Verlag, Basel, 1977.
- [104] Sih G., Yu Tzou D., *Three-dimensional transverse fatigue crack growth in rail head*, Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 7(11), 2006.
- [105] Skorko M., *Fizyka podręcznik dla studentów wyższych technicznych studiów zawodowych dla pracujących*, PWN, Warszawa, 1976.
- [106] *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.
- [107] Stefańczyk A., *Sekrety języka C#*, Internetowe Wydawnictwo Złote Myśli sp. z o.o., 2008.
- [108] Stern J., *A method for reducing costs and improving railway vehicles*, World Congress on Railroad Research, 1993.
- [109] Sysak J., *Drogi Kolejowe*, PWN, Warszawa, 1986.
- [110] Szmagliński J., Szwaczkiewicz K., *Modernization of tram lines with the use of railway design standards*, Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym, 2015.
- [111] Szwaczkiewicz K., *Komputerowe wspomaganie zmian modernizowanych układów geometrycznych toru*, IV Konferencja Naukowo-Techniczna Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym INFRASZYN 2011, 2011.
- [112] Szwaczkiewicz K., *Komputerowe wspomaganie zmian modernizowanych układów geometrycznych toru*, rojektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym INFRASZYN 2011 : IV Konferencja Naukowo - Techniczna, Radom, 2011.
- [113] Szwaczkiewicz K., *Komputerowe wspomaganie modernizacji łuków poziomych na liniach kolejowych*, Technika Transportu Szynowego, (9), 2012.

- [114] Szwaczkiewicz K., *Komputerowe wspomaganie zmian modernizowanych układów geometrycznych toru kolejowego z wykorzystaniem programu MUGO*, W.P. Gdańskiej (red.), *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej. Inżynieria Wodna i Łądowa*, 2012.
- [115] Szwaczkiewicz K., *Koncepcja zastosowania algorytmów genetycznych przy modernizacji układów geometrycznych*, *Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie*, (3(99)), 2012.
- [116] Szwaczkiewicz K., *Obliczanie robót ziemnych przy modernizacji linii kolejowych*, *Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie*, (3(102)), 2013.
- [117] Szwaczkiewicz K., *Wpływ przechyłki na zjawisko postępowania zużycia bocznego szyn kolejowych w łukach poziomych*, W.P. Gdańskiej (red.), *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej. Inżynieria Wodna i Łądowa*, 2013.
- [118] Szwaczkiewicz K., *Earthworks calculations due to reconstruction of railway geometrical layout*, *Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym*, 2014.
- [119] Szwaczkiewicz K., *Modernizacja układów geometrycznych toru z wykorzystaniem metody oceny wielokryterialnej*, *Przegląd Komunikacyjny*, (9), 2015.
- [120] Szwaczkiewicz K., Szmagliński J., *Ocena kosztu cyklu życia szyn kolejowych w modernizacji układów geometrycznych*, *Przegląd Komunikacyjny*, (9), 2015.
- [121] Szwaczkiewicz K., Szmagliński J., *Propozycja wykorzystania praktyki kolejowej przy modernizacji torów tramwajowych*, *Logistyka*, (4), 2015.
- [122] Trojanowski K., *Metaheurystyki praktycznie*, Wydanie drugie, poprawione, WSISiZ, Warszawa, 2008.
- [123] Turczyn K., *Wybrane problemy bocznego zużycia szyn*, *Przegląd Kolejowy*, 7, 1993.
- [124] van Laarhoven P., Aarts E., *Simulated Annealing: Theory and Applications*, *Mathematics and Its Applications*, Springer Netherlands, 1987.
- [125] Venter G., Sobieszczanski-Sobieski J., *Particle swarm optimization*, *AIAA Journal*, 11(8), 2003.
- [126] Šachunjanec G.M., *O srokach sluzby reslov*, *Put' i Putevoe Chozjajstvo*, (10), 1971.
- [127] *Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych Id-1 (D-1)*, PKP PLK S.A., Warszawa, 2004.
- [128] Wełnic P., *Szacowanie kosztu cyklu życia według PNEN 60300-3-3*, *TTS*, 6, 2009.
- [129] Wierzchoń S.T., *Sztuczne systemy immunologiczne. Teoria i zastosowania*, *Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT*, Warszawa, 2001.
- [130] Wojtczak R., *Wykorzystanie programu komputerowego railab w pracy inżyniera dróg kolejowych*, *Przegląd Komunikacyjny*, (9), 2015.
- [131] Woźnica P., Zboiński K., *Koncepcja oceny i kształtowania kolejowych krzywych przejściowych z wykorzystaniem pełnego modelu dynamicznego pojazdu*, *Przegląd Komunikacyjny*, (9-10), 2009.
- [132] Woźnica P., Zboiński K., *Wykorzystanie zaawansowanego modelu dynamicznego pojazdu w optymalizacji kształtu kolejowych krzywych przejściowych*, *Logistyka*, (4), 2010.
- [133] Yang X.S., *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*, Luniver Press, 2008.
- [134] Zabielski P., Koszelew J., Zimnoch R., *Problem komiwojażera z zyskami i oknami czasowymi dla sieci o wagach zmiennych w czasie i jego zastosowania w systemach typu e-tourism*, *Symulacja w Badaniach i Rozwoju*, 3(3), 2012.
- [135] Zakharov S., Komarovskiy I., Zharov I., *Wheel flange/rail head wear simulation*, *Wear*, 215, 1998.
- [136] Zboiński K., *Dynamical investigation of railway vehicles on a curved track*, *European Journal of Mechanic*, 17, 1998.