

# Modernizacja układów geometrycznych toru z wykorzystaniem metody oceny wielokryterialnej

Kamila Szwackiewicz



mgr inż. Kamila Szwackiewicz

Katedra Transportu Szynowego  
i Mostów  
Wydział Inżynierii Lądowej i  
Środowiska  
Politechnika Gdańska

kamszac@pg.gda.pl

Modernizacja linii kolejowej jest złożonym procesem, w którym trudno jest określić jedno najistotniejsze kryterium do oceny zaproponowanych wariantów projektowych. Dlatego też na etapie studium wykonalności przykładowe warianty oceniane są w gronie ekspertów. Wynikiem takich analiz powinno być rozwiązanie, które będzie spełniało założone parametry techniczno-eksploatacyjne ale uwzględniające zarówno dotychczasowy układ geometryczny toru, stan istniejącej infrastruktury, jak i aspekty ekonomiczne całej inwestycji. W Polsce najczęściej wybór wariantu zależy od kosztu przedsięwzięcia [13].

Przebudowa układu geometrycznego toru jest integralną częścią procesu modernizacyjnego. Tworzenie wariantów projektowych i ich analiza nie jest jednak zautomatyzowana. Programy CAD (Computer Aided Design) stanowią znaczną pomoc w graficznym opracowaniu projektu, nie są to jednak narzędzia optymalizujące układ geometryczny. Projektant na podstawie obliczeń i zdobytego doświadczenia określa główne parametry układu a program przedstawia opisany układ w formie graficznej. Istnieje zatem potrzeba stworzenia narzędzia, które umożliwiłoby sprawne generowanie wariantów projektowych jak i ich ocenę. W związku z cechami przedsięwzięcia i złożonością zagadnienia potrzebne są metody analizy wielokryterialnej.

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 dany problem. Może być wykorzystywana również, gdy założymy że dane kryterium jest najważniejsze. Takie zadanie sprowadza się do wyłonienia najlepszego rozwiązania spełniającego założony cel, czyli opisanego wartością najmniejszą lub największą. W bardziej złożonych problemach, optymalizacja jednego parametru

jest jednak nie 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).

## Wybór metody obliczeń

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 [13]:

- 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 błądzących,
- charakter linii.

Z pośród tych parametrów wybrano główne trzy kryteria, które będą uwzględnione w dalszej analizie:

- koszt inwestycji i utrzymania - określony z wykorzystaniem obliczeń kosztu cyklu życia LCC (Life Cycle Cost [3]) dla

szyn kolejowych,

- zakres 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 różniących się od siebie rozwiązań, które następnie będą podlegały ocenie. Podjęto decyzję, że w procesie optymalizacyjnym będzie można posłużyć się algorytmami ewolucyjnymi. Algorytmy genetyczne (Genetic Algorithms) zbudowane zostały na podstawie mechanizmów ewolucyjnych występujących w przyrodzie [10]. Procesy te mają na celu stworzenie populacji składającej się z różnorodnych osobników mniej lub bardziej przystosowanych do przetrwania. W przypadku projektowania układu geometrycznego (łuk poziomy) mianem osobnika określono układ opisany dwoma parametrami:

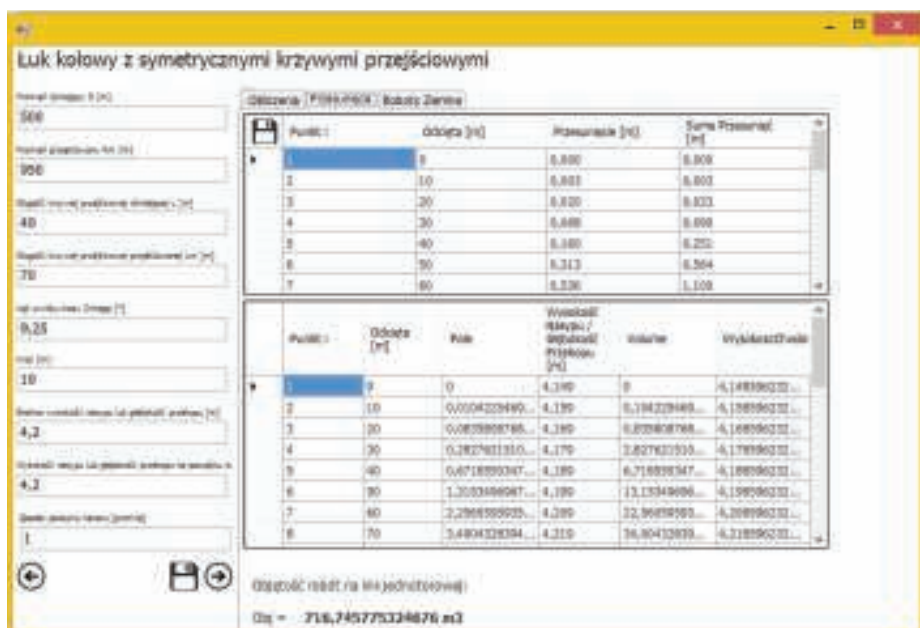
- Promieniem łuku RM,
- Długością krzywej przejściowej LM.

W algorytmach tych do potomnej populacji mają zostać skopiowane najlepsze, czyli najlepiej przystosowane osobniki. Oznacza to, że układy cechujące się największą wartością przystosowania, czyli maksymalną (minimalną) wartością funkcji celu, będą wybierane do następnej iteracji.

Omawiane zagadnienie optymalizacji wielokryterialnej może zostać zrealizowane przy pomocy wspomaganie komputerowego. Opracowane algorytmy obliczeniowe [1,2,9] zostały zaimplementowane w języku C# w programie MUGO (Rys.1). Program ten składa się z modułów, w których można wyznaczyć m.in. roboty ziemne i przesunięcia układu projektowanego względem istniejącego jak również wygenerować układy geometryczne będące wynikiem optymalizacji wielokryterialnej.

## Dobór funkcji celu

Dobór odpowiedniej funkcji celu (w algorytmach genetycznych określanej jako *FF* - fitness function) ma kluczowe znaczenie w procesie optymalizacji. Często podsta-



1. Widok okien programu MUGO

wowa postać funkcji celu ulega zmianie na etapie analizy generowanych rozwiązań. Opisane kroki pozwalają na znalezienie takiej funkcji celu, która będzie umożliwiała określenie najlepszych układów (z punktu widzenia przyjętych kryteriów). W omawianym przypadku funkcja celu została przedstawiona za pomocą zależności:

$$FF = \frac{1}{w_{\text{koszt}} \cdot LCC_{\text{szyn}} + w_{\text{obj}} \cdot |RZ| - w_{\text{pred}} \cdot V_{\text{max}}^2}$$

gdzie:

$w_{\text{koszt}}$  - waga dotycząca kosztu cyklu życia szyn,

$LCC_{\text{szyn}}$  - koszt cyklu życia szyn kolejowych,

$w_{\text{obj}}$  - waga dotycząca objętości robót ziemnych,

$RZ$  - objętość robót ziemnych,

$w_{\text{pred}}$  - waga dotycząca prędkości,

$V_{\text{max}}$  - prędkość możliwa do osiągnięcia dla danego układu geom.

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.

Koszt cyklu życia (LCC) dla szyny kolejowej obejmuje koszty od momentu jej powstania aż do momentu demontażu [3]. Zatem, w kosztach tych uwzględniane są zarówno koszty inwestycyjne, operacyjne jak i te związane z ich utrzymaniem. Kosztem inwestycyjnym w tym wypadku jest zakup szyn kolejowych. Ich montaż, szlifowanie wstępne i spawanie (zgrzewanie)

obliczane jest jako koszty operacyjne. W obliczeniach koszty utrzymania zależą od wartości zużycia pionowego i bocznego szyn. Modele obliczeniowe dotyczące degradacji szyn opierają się na wynikach badań projektu INNOTRACK[6,7]. Na tej podstawie określone są koszty utrzymania czyli koszty szlifowania i wymiany szyn. W omawianej funkcji celu do obliczeń przyjmuje się 30 letni 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 [8], takie przypadki należy traktować jako niekorzystne z uwagi na utrzymanie.

Obliczenia objętości robót ziemnych wykonuje się na podstawie opracowanych wcześniej algorytmów. Wartość objętości obliczana jest dla zadanych różnic wysokości (wysokości nasypów lub głębokości przekopów), pochylenia podłużnego i poprzecznego terenu. Dokładność obliczeń zależy od przyjętego kroku obliczeniowego. Szczegółowy opis metody obliczeń robót ziemnych został zawarty w pracach [11,12].

Dla każdego generowanego przypadku oblicza się prędkość możliwą do osiągnięcia dla danego układu geometrycznego. W kryterium prędkościowym wartość prędkości podniesiona jest do kwadratu aby zwiększyć znaczenie tego parametru.

Wartości współczynników wag dla każdego kryterium w obecnej fazie analiz do-

bierane są intuicyjnie. Na podstawie analiz łatwo można zorientować się, że każdy przypadek wymaga odrębnego podejścia. Na dobór tych wag mają wpływ np. parametry układu istniejącego. Przykładowo, analizy wykazują, że lepsze rezultaty dla układów istniejących z małymi promieniami otrzymywane są, gdy większa waga przypisywana jest kryteriom związanym z kosztami utrzymania i robotami ziemnymi. Ponadto, rzędy wielkości każdego z parametrów różnią się od siebie. Dlatego też określanie współczynników wag odbywa się poprzez generowanie i analizę rozwiązań dla różniących się od siebie układów istniejących.

### Przyjęte założenia

W opracowywanym algorytmie optymalizacyjnym przyjęto następujące założenia dotyczące tworzonych układów geometrycznych. Układ istniejący jest łukiem poziomym składającym się z:

- łuku kołowego,
- łuku kołowego z dwoma krzywymi przejściowymi postaci paraboli trzeciego stopnia (o tej samej długości),
- dwóch łuków kołowych tj. łuk kosztowy,
- dwóch krzywych przejściowych tj. łuk paraboliczny.

Założono, że dane są następujące informacje dotyczące istniejącego układu:

- długości krzywych przejściowych,
- promień łuku kołowego (promienie łuków kołowych),
- kąt zwrotu trasy,
- kąt środkowy pierwszego łuku (tylko w przypadku łuku kosztowego),
- wysokości nasypów/ głębokości przekopów,
- prędkość maksymalną dla układu istniejącego,
- uśrednioną prędkość pociągów najwolniejszych kursujących na linii,
- wartość przyspieszeń dośrodkowego i odśrodkowego,
- spadek poprzeczny i podłużny terenu.

Zakłada się, że istniejący układ należy zmodernizować, ponieważ nie spełnia założeń dotyczących maksymalnej prędkości przejazdu pociągów. Układ projektowany musi spełniać postawiony warunek i być jednocześnie zaprojektowany zgodnie z obowiązującymi przepisami [4,5]. Proponowany algorytm obliczeniowy zapewnia spełnienie obu założeń. W rezultacie podawane są wszystkie najlepsze (o najwyższej wartości funkcji celu) rozwiązania dla każdego pokolenia (każdej przeprowadzonej iteracji). Zakończenie procesu optymalizacyjnego może odbywać się na dwa sposoby:

- w wyniku znalezienia rozwiązania bardzo dobrego – w takim przypadku algorytm w kolejnych iteracjach pokazuje tylko to rozwiązanie,
- w razie nie znalezienia oczekiwanego rozwiązania, algorytm kończy pracę po ustalonej liczbie cykli.

W każdym przypadku otrzymuje się wiele różniących się od siebie rozwiązań, które można traktować jako warianty układów możliwe do wykorzystania w studium wykonalności modernizacji linii kolejowej. Rozwiązania te są losowe i niekiedy należy część z nich odrzucić. Takie przypadki występują jednak rzadko i odznaczają się małą wartością funkcji celu, stąd zlokalizowanie ich jest stosunkowo proste. Szczegółowy opis generowania osobników (układów geometrycznych) i działania algorytmu genetycznego został przedstawiony w pracy [10].

Należy dodać, 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 założonymi minimalnymi ich wartościami.

Po zakończeniu procesu optymalizacyjnego w module optymalizacyjnym programu MUGO wyświetlane są następujące dane (Rys.2):

- promień łuku projektowanego  $R_M$ ,
- długość krzywych przejściowych  $L_M$ ,
- przechyłka dla nowego układu  $h$ ,
- maksymalne odsunięcie układu istniejącego od projektowanego  $w_{max}$ ,
- objętość robót ziemnych [11,12]  $O_{bj}$ ,
- maksymalna prędkość przejazdu pociągów dla projektowanych parametrów  $V_{max}$ ,
- wartość funkcji celu  $FF$ .

### Przykład zastosowania metody optymalizacji wielokryterialnej

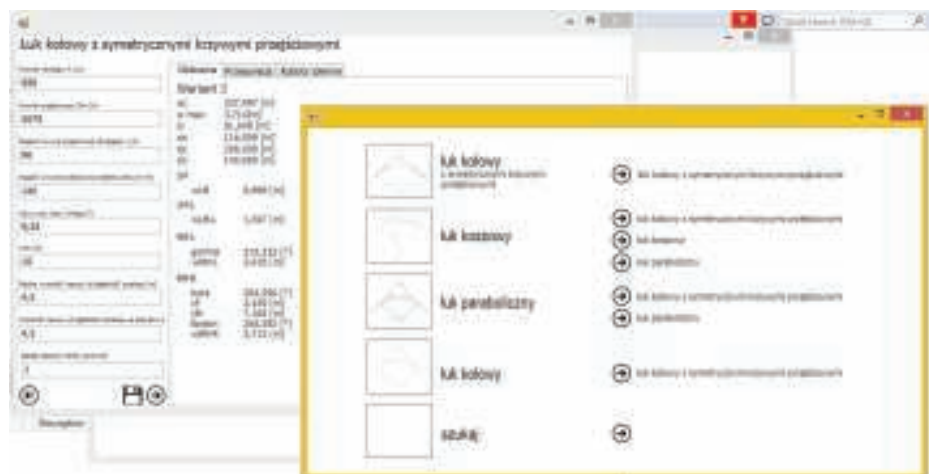
Dla pierwszego przypadku układ istniejący to łuk kołowy na linii jednotorowej o promieniu  $R=950$  m z krzywymi przejściowymi postaci paraboli trzeciego stopnia długości  $L=90$  m. Kąt zwrotu trasy wynosi  $\omega=9,25^\circ$  gdzie prędkość maksymalna wynosi  $V_{max}=120$  km/h. Przyspieszenie dośrodkowe wynosi  $a_c=0,42$  m/s<sup>2</sup>. Wysokość nasypu na początku krzywej układu istniejącego wynosi 3 m a spadek podłużny terenu 1‰.

Przykładowe wyniki wygenerowane przez program zawarte są w tabeli 1.

Założono, że wymagana maksymalna prędkość musi być równa 160km/h. Łatwo zaobserwować, że pierwszy przykładowy



2. Przykładowy ekran z wynikami w module optymalizacyjnym programu MUGO



3. Wydruk szczegółowych danych w programie MUGO dla układu 5 z drugiego przykładowego obliczeniowego

Tab. 1. Przykładowe wyniki wygenerowane przez program

Lp.	$L_M$ [m]	$R_M$ [m]	$h$ [mm]	$w_{max}$ [m]	$Obj$ [m <sup>3</sup> ]	$V_{max}$ [km/h]	FF
1	130	1350	135	1,473	1083,528	150	2,1815E-07
2	150	1550	125	2,210	1752,846	160	1,7143E-07
3	158	1600	120	2,418	1958,921	170	1,6049E-07
4	150	1600	120	2,354	1883,581	170	1,6571E-07
5	145	1800	115	2,908	2403,708	170	1,4782E-07
6	137	1800	115	2,856	2335,956	170	1,5205E-07
7	145	1500	125	2,025	1576,730	160	1,8144E-07
8	161	1650	120	2,586	2126,975	170	1,5348E-07
9	137	1400	130	1,673	1260,509	160	2,0262E-07
10	156	1600	120	2,402	1939,701	170	1,6178E-07
11	144	1550	125	2,162	1694,668	160	1,7592E-07
12	140	1450	130	1,841	1405,843	160	1,9249E-07
13	138	1450	130	1,825	1388,721	160	1,9425E-07
14	137	1500	125	1,963	1503,544	160	1,8806E-07
15	155	1550	125	2,250	1799,922	170	1,6789E-07
16	152	1550	125	2,226	1771,404	170	1,7E-07
17	156	1600	120	2,402	1939,701	170	1,6178E-07
18	159	1600	120	2,426	1968,630	170	1,5985E-07



**Tab. 2.** Przykładowe wyniki dla układu 120 km/h

Lp.	L <sub>M</sub> [m]	R <sub>M</sub> [m]	h [mm]	w <sub>max</sub> [m]	Obj [m <sup>3</sup> ]	V <sub>max</sub> [km/h]	FF
1	80	900	125	1,468	683,184	120	3,4266E-07
2	82	1250	110	2,541	1348,400	140	2,4513E-07
3	79	1100	115	2,063	1027,687	130	2,8472E-07
4	85	950	125	1,654	790,582	120	3,1598E-07
5	70	950	125	1,552	716,746	120	3,4836E-07

układ nie spełnia tego założenia, więc nie będzie brany pod uwagę. Mimo to układ ten odznacza się najwyższą wartością funkcji dopasowania z uwagi na najmniejszy zakres robót ziemnych. Najlepszym układem ze względu na funkcję FF (funkcja jest maksymalizowana) jest układ 9 (tabela 1), przy stosunkowo niewielkim odsunięciu (maksymalnie do 1,673m) otrzymuje się żądaną prędkość. Można zauważyć, że układy 2 i 16 nie wiele różnią się od siebie (długość krzywej przejściowej jest dłuższa o 2m dla układu 16). Niemniej jednak w układzie 16 można przejechać z prędkością większą o 10km/h jest to więc układ znacznie korzystniejszy z uwagi na kryterium prędkościowe a określony jest mniejszą wartością funkcji FF. Ponieważ wynikiem działania algorytmu genetycznego jest skrócona liczba układów o różnych wartościach funkcji celu, otrzymane wartości powinny się następnie przeanalizować i dopasować do przyjętych wymagań.

W drugim przypadku zmieniono dane z pierwszego przypadku w ten sposób, że dla układu istniejącego promień wynosi 500 m a długość krzywych przejściowych jest równa 40m. Założono, że układ ma być zmodernizowany do prędkości 120km/h. Wyniki zamieszczono w tabeli 2.

W tym przypadku najwyższą wartość funkcji dopasowania ma układ o numerze 5. W obu przypadkach współczynniki

wag zostały dobrane tak, aby przy jak najmniejszych nakładach finansowych został spełniony warunek na zapewnienie określonej wartości prędkości maksymalnej. Szczegółowe wyniki dla układu 5 dla kroku obliczeniowego równego 10 m zostały zaprezentowane w tabeli 3. Rysunek 3 obrazuje formę w jakiej moduł obliczeniowy programu MUGO przedstawia wyniki szczegółowych obliczeń dla tego przypadku.

## Wnioski

Metoda wielokryterialnej oceny przebudowy układów geometrycznych toru została zaimplementowana do modułu optymalizacyjnego programu MUGO. Na obecnym etapie analiz program generuje przykładowe rozwiązania, ocenia wyniki przy pomocy funkcji celu.

Pozostałe moduły programu obliczają dodatkowo przesunięcia osi toru, roboty ziemne i punkty charakterystyczne dla układu istniejącego i projektowanego.

Dalszy kierunek prac będzie dotyczył opracowania współczynników wag nadających znaczenie kryteriom funkcji celu. ◀

## Materiały źródłowe

[1] Bałuch H., Bałuch M., Układy geometryczne toru i ich deformacje. KOW, Warszawa 2010.

[2] Bałuch M., The assessment of changes of track geometrical layout in the process of feasibility studies of railways modernization. Archives of Civil Engineering, Nr 4, 2006.

[3] Borghagen L., Brinkhagen L.: LCC Procurement at the Swedish State Railways,

Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, IEEE, 1984.

[4] Dz. U. nr 151 poz. 987 z dnia 10 września 1998 roku: Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie.

[5] Dz. U. 2014 poz. 867 z dnia 5 czerwca 2014 roku: Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju zmieniające Rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie.

[6] INNOTRACK Integrated Project (IP) Thematic Priority 6: Sustainable Development, Global Change and Ecosystems D4.1.4 Rail Degradation Algorithms, 2006.

[7] INNOTRACK Guideline, Definitive guidelines on the use of different rail grades, Deliverable report D4.1.5GL, 2006.

[8] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.: Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych Id-1, Warszawa 2005.

[9] Szwaczekiewicz K., Kędra Z. Obliczanie przesunięć osi toru przy modernizacji układów geometrycznych. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie Nr 2(101), Kraków 2013

[10] Szwaczekiewicz K. Koncepcja zastosowania algorytmów genetycznych przy modernizacji układów geometrycznych. Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP oddział w Krakowie Nr 3(99), Kraków 2012.

[11] Szwaczekiewicz K. Obliczanie robót ziemnych przy modernizacji linii kolejowych. Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP oddział w Krakowie, Nr 3(102). Kraków 2013.

[12] Szwaczekiewicz K., Earthworks calculations due to reconstruction of railway geometrical layout. Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym. SITK RP, Radom 2014.

[13] Szwaczekiewicz K., Szmagliński J. Propozycja wykorzystania praktyki kolejowej przy modernizacji torów tramwajowych. Logistyka, Nr 3. Poznań 2015.

**Tab. 3.** Przykładowe wyniki dla układu 5

Lp.	Odcięta (Krok obliczeniowy) [m]	Przesunięcie układu projektowanego od istniejącego [m]	Suma przesunięć [m]	Pole przekroju poprzecznego nasypu [m <sup>2</sup> ]	Wysokość nasypu [m]	Objętość [m <sup>3</sup> ]
1	0	0	0	0	4,149	0
2	10	0,003	0,003	0,010423	4,159	0,104225
3	20	0,02	0,023	0,083581	4,169	0,835809
4	30	0,068	0,09	0,282762	4,179	2,827622
5	40	0,16	0,251	0,671855	4,189	6,71855
6	50	0,313	0,564	1,31535	4,199	13,1535
7	60	0,536	1,1	2,25606	4,209	22,5606
8	70	0,806	1,906	3,400433	4,219	34,00433
9	80	1,086	2,992	4,594075	4,229	45,94075
10	90	1,329	4,322	5,634043	4,239	56,34043
11	100	1,487	5,809	6,317745	4,249	63,17745
12	110	1,55	7,359	6,60167	4,259	66,0167
13	111,6854	1,551	8,91	6,609426	4,26	22,27911
SUMA Cały układ			16,269			716,746