

Władysław Koc¹
Piotr Chrostowski²

TWORZENIE POLIGONU KIERUNKÓW GŁÓWNYCH TRASY KOLEJOWEJ Z WYKORZYSTANIEM POMIARÓW GPS

Streszczenie

W pracy przedstawiono kolejny moduł opracowywanego w Politechnice Gdańskiej programu komputerowego SATTRACK do wizualizacji, oceny i projektowania trasy kolejowej, dostosowanego do techniki ciągłych pomiarów satelitarnych. Jest to moduł TRACK_POL, służący do tworzenia poligonu kierunków głównych trasy kolejowej. Zapisane w pliku tekstowym współrzędne prostych wykorzystuje się do wyznaczenia ich równań w państwowym układzie odniesień przestrzennych 2000. Mając wyznaczone równania wszystkich prostych, jesteśmy w stanie określić współrzędne punktów głównych trasy oraz kąty zwrotu. Pokazano opis funkcjonowania programu oraz przykład jego zastosowania obejmujący nałożenie poligonu na kilkudziesięciokilometrowy odcinek pomierzonej satelitarnie linii kolejowej. Wyjaśniono również zasady wykorzystania programu w celu przygotowania danych do oceny odcinków trasy położonych w łuku.

Słowa kluczowe: tor kolejowy, pomiary satelitarne GPS, układ geometryczny, wspomaganie komputerowe

1. Wprowadzenie

Efektywne wykorzystanie systemu GPS [9] w pomiarach ukształtowania geometrycznego linii kolejowych stało się możliwe po uruchomieniu w naszym kraju (w połowie 2008 roku) Aktywnej Sieci

¹ prof. dr hab. inż., Politechnika Gdańska, tel. (58) 3471026, e-mail: kocwl@pg.gda.pl

² dr inż., Politechnika Gdańska, tel. (58) 3486090, e-mail: piotrchrost@gmail.com

Geodezyjnej ASG-EUPOS [1, 8]. Na początku 2009 roku zespół badawczy Politechniki Gdańskiej, Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni, Zakładu Linii Kolejowych PKP PLK S.A. w Gdyni oraz firmy Leica Geosystems GA przeprowadził eksperyment pomiarowy na eksploatowanej linii kolejowej. Polegał on na objeździe kilkudziesięciokilometrowego odcinka linii ciągnikiem szynowym WM-15 z przyczepą (wagonem-platformą) PWM-15, na której zostały zainstalowane anteny do pomiarów satelitarnych GPS, rejestrujące współrzędne z częstością 20 Hz oraz dokładnościami wyznaczenia współrzędnych płaskich na poziomie $1\div 3$ cm [6]. W 2010 roku dwie podobne kampanie pomiarowe (w innych lokalizacjach) zostały zrealizowane ponownie, przy czym ich metodyka została odpowiednio zmodyfikowana.

Już pierwsze pomiary wykazały, że zastosowana technika pomiarowa otwiera zupełnie nowe perspektywy w zakresie określania rzeczywistego położenia toru. Jej wykorzystanie umożliwia bardzo precyzyjne określenie podstawowych danych do projektowania, modernizacji linii kolejowej [6]. Pozwala ona na odtworzenie kierunków prostych trasy (i określenie występujących na nich deformacji poziomych), a także rejonu zmiany kierunku trasy (kąty zwrotu trasy, łuki kołowe i krzywe przejściowe).

Pomiary satelitarne toru kolejowego dostarczają ogromne ilości danych, które trzeba najpierw zarchiwizować, a następnie poddać odpowiedniej obróbce w celu uzyskania informacji przydatnych z praktycznego punktu widzenia. Dlatego też dla wdrożenia omawianej procedury niezbędne staje się opracowanie odpowiedniego wspomaganie komputerowego.

2. Program komputerowy SATTRACK

Współczesne techniki wspomaganie komputerowego, zwane powszechnie CAD (computer aided design), realizują takie funkcje jak:

- obliczenia numeryczne obiektu/konstrukcji (realizowane głównie metodą elementów skończonych),
- graficzne odwzorowanie obiektu (grafika wektorowa),
- wizualizacja projektowanego obiektu (rysunki techniczne, animacje, symulacje).

Należy zauważyć, że w odniesieniu do technik CAD analiza przebiegu trasy kolejowej nie ogranicza się wyłącznie do pracy na materiałach graficznych (rysunkach sytuacyjnych), lecz polega przede wszystkim na wykorzystywaniu odpowiednich danych liczbowych, których zbieżność z rzeczywistymi cechami danej linii jest w pełni gwarantowana. Tymi danymi mogą być, przykładowo, uzyskane w wyniku pomiarów satelitarnych współrzędne punktów osi trasy, a także cały szereg informacji otrzymywanych w trakcie analizy danych pomiarowych.

W Katedrze Transportu Szynowego Politechniki Gdańskiej trwa obecnie opracowywanie programu komputerowego SATTRACK do wizualizacji, oceny i projektowania trasy kolejowej, dostosowanego do techniki ciągłych pomiarów satelitarnych [4]. Zdecydowano, że pierwsza wersja programu zostanie napisana w języku skryptowym programu Scilab [10], stworzonego w 1990 r. we Francji przez Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique oraz École Nationale des Ponts et Chaussées (najstarszą szkołę inżynierską na świecie). Środowisko Scilab posiada język programowania wysokiego poziomu oraz tak zwany interpreter, który pozwala na pisanie, a następnie wykonywanie stworzonych przez użytkownika własnych programów w postaci pakietu skryptów, zawierających kod źródłowy programu oraz zdefiniowane funkcje (tzw. metody) użytkownika. Jako że Scilab został stworzony z myślą o badaniach matematycznych, posiada bardzo bogatą bibliotekę (kilkaset metod) oraz środowisko graficzne, w którym można tworzyć wykresy oraz animacje. Licencja programu ma charakter Open Source, w związku z czym jest on powszechnie używany przez środowiska naukowe oraz preferowany przez programistów na całym świecie.

Na cały program SATTRACK składa się pięć, w znacznym stopniu niezależnych, modułów obejmujących:

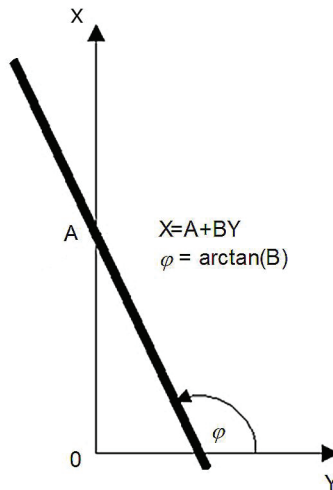
- wizualizację przebiegu trasy kolejowej,
- ocenę odcinków prostych trasy,
- tworzenie poligonu kierunków głównych trasy,
- ocenę odcinków trasy położonych w łuku,
- projektowanie rejonu zmiany kierunku trasy.

Do chwili obecnej ukończony został moduł TRACK_VIS [4], służący do wizualizacji przebiegu trasy kolejowej, moduł TRACK_STRAIGHT [3] do oceny odcinków prostych trasy, a także będący przedmiotem niniejszego opracowania moduł TRACK_POL do tworzenia poligonu

kierunków głównych trasy. Prace nad pozostałymi modułami nadal trwają.

3. Metodyka obliczeń

Moduł TRACK_POL stwarza możliwość utworzenia poligonu kierunków głównych trasy kolejowej (w postaci wielokąta otwartego złożonego z przecinających się prostych) i nałożenia go na istniejący przebieg trasy określony na drodze ciągłych pomiarów satelitarnych. Pomierzone współrzędne punktów tworzących poszczególne proste wykorzystuje się do wyznaczenia – metodą najmniejszych kwadratów – ich równań w układzie Y, X w postaci $X = A_i + B_i Y$, gdzie $i = 1, 2, \dots, n+1$, zaś n oznacza występującą liczbę punktów głównych trasy. Z punktu widzenia poszukiwań rzeczywistego kierunku trasy kluczową wartość stanowią tutaj współczynniki nachylenia $B_i = \tan \varphi_i$ (rys. 1). Mając wyznaczone równania wszystkich prostych w układzie 2000, jesteśmy w stanie określić kąty zwrotu oraz współrzędne punktów głównych trasy.



Rys. 1. Odcinek prostej w układzie współrzędnych 2000

Obliczamy najpierw kąty nachylenia poszczególnych prostych ze wzoru:

$$\varphi_i = \arctan B_i, i = 1, 2, \dots, n+1 \quad (1)$$

Następnie wyznaczamy wartości kątów zwrotu trasy:

$$\alpha_i = \varphi_i - \varphi_{i+1}, i = 1, 2, \dots, n+1 \quad (2)$$

Współrzędne punktów głównych trasy ($i = 1, 2, \dots, n$) są następujące:

$$Y_i = \frac{A_{i+1} - A_i}{B_i - B_{i+1}}, \quad (3)$$

$$X_i = A_i + B_i Y_i. \quad (4)$$

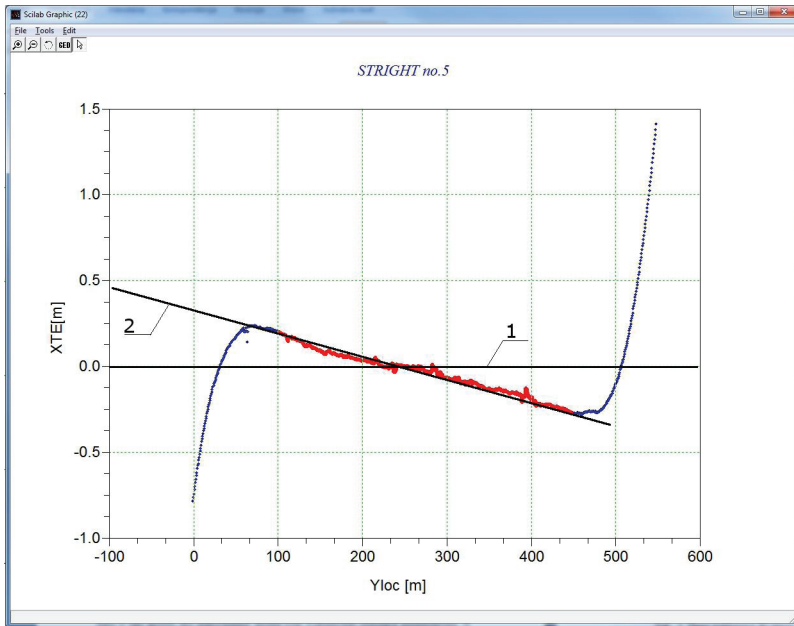
4. Opis programu komputerowego

TRACK_POL jest modułem programu SATTRACK przeznaczonym do wygenerowania poligonu kierunków głównych analizowanego odcinka trasy kolejowej. Wykorzystując analizy wykonane na współrzędnych zarchiwizowanych na drodze pomiarów satelitarnych, program pozwala na odtworzenie kierunków głównych w zapisie analitycznym oraz generuje podgląd w postaci wykresów. Wyznaczone równania zidentyfikowanych odcinków prostych, współrzędne punktów przecięcia kierunków trasy oraz kąty, które tworzą między sobą owe kierunki stanowią podstawę do rozpoczęcia procesu projektowania rejonów zmiany kierunków trasy w planie sytuacyjnym, tj. krzywych przejściowych i łuków kołowych, w państwowym układzie odniesień przestrzennych 2000.

Przyjmowanie kierunków głównych trasy odbywa się na drodze analizy układu pomierzonych satelitarnie punktów. Liniowa analiza regresji umożliwia odtworzenie kierunku w postaci funkcyjnej, przez co otrzymany wynik jest optymalnym opisem istniejącego układu prostych. Fakt ten nie pozostaje bez znaczenia, gdyż jednym z zadań projektanta jest stworzenie nowego przebiegu trasy (dla potrzeb modernizacji linii) w taki sposób, aby maksymalnie można było wykorzystać istniejącą infrastrukturę.

W świetle powyższych konkluzji, praca modułu TRACK_POL poprzedzona musi być odpowiednią analizą, którą w przypadku odcinków prostych trasy umożliwia moduł TRACK_STRAIGHT [3]. W module tym projektant ocenia wyodrębnione z przebiegu trasy odcinki proste, jednocześnie dążąc do uzyskania jak największej wartości współczynnika korelacji, przy zachowaniu możliwie dużego zakresu danych. Zaznaczając zakres punktów użytkownik ma możliwość oce-

ny wartości parametrów prostej oraz współczynnika R^2 w zależności od wybranego zakresu. Analiza ta jest konieczna z uwagi na fakt, że bardzo łatwo można zaburzyć prawidłowy, optymalny kierunek główny, przy czym za optymalny uważa się ten kierunek, który najlepiej opisuje – z punktu widzenia analizy regresji i korelacji – rozpatrywany zbiór punktów przynależny do odcinka prostego. Zaburzenie to może wynikać z przyjęcia do analizy punktów należących do odcinków krzywoliniowych (jak np. krzywych przejściowych) lub będących skutkiem deformacji powstałej w trakcie eksploatacji toru, a także obserwacji obciążonych dużym błędem pomiarowym. Przykład wystąpienia konieczności odcięcia pewnego zbioru punktów pokazano na rysunku 2. Wychwycenie zakresu tych punktów jest możliwe jedynie poprzez przedstawienie ich na wykresie o mocno skażonej skali [3].



Rys. 2. Analiza zakresu punktów reprezentujących odcinek prostej nr 5; 1 - prosta regresji bez odrzucenia odcinków nieliniowych, 2 - prosta po odrzuceniu punktów z zakresu nieliniowego (kolorem czerwonym zaznaczono zakres punktów przeznaczony do dalszej analizy)

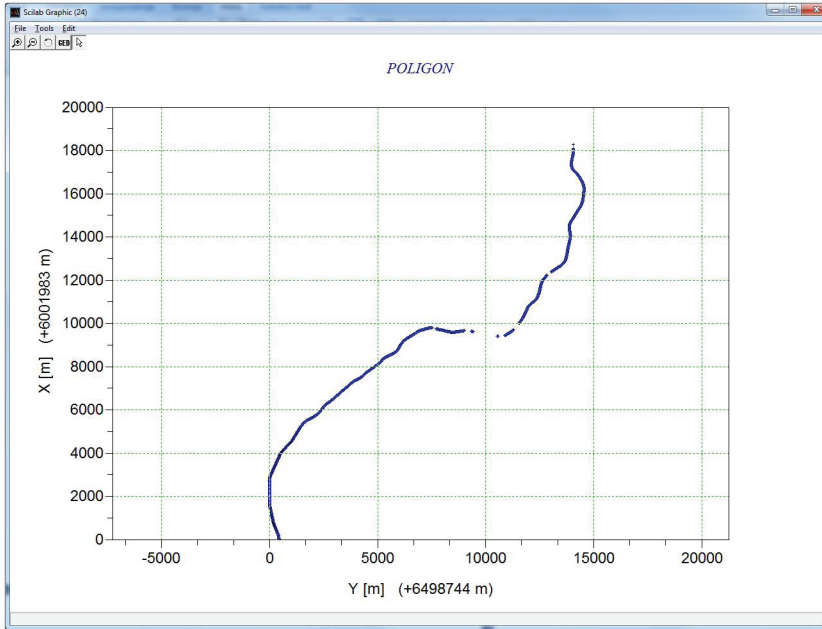
Rezultatem wykorzystania modułu TRACK_STRAIGHT jest dla projektanta zestaw danych wejściowych do pracy w module TRACK_POL. Dane te obliczane są automatycznie w trakcie analizowania konkretnych odcinków. Do pliku zapisywane są następujące informacje: osta-

tecznie przyjęte parametry wyznaczonych równań prostych (współczynnik kierunkowy B oraz wartość A jako punkt przecięcia prostej z osią X) w układzie 2000. Ponadto zapisywane są odcięte Y_p oraz Y_k pierwszego i ostatniego punktu przyjętego do analizy zbioru. Wartości tych odciętych wykorzystywane są do obliczenia rzędnych punktu początkowego i końcowego – odpowiednio – pierwszej oraz ostatniej prostej poligonu z wykorzystaniem równań prostych. Dla pozostałych (pośrednich) odcinków punkty początkowe i końcowe są wyznaczone przez współrzędne wierzchołków tworzonego przez te odcinki wieloboku. Fragmentu danych wejściowych obejmujących sześć odcinków prostych pokazano w tabelicy 1.

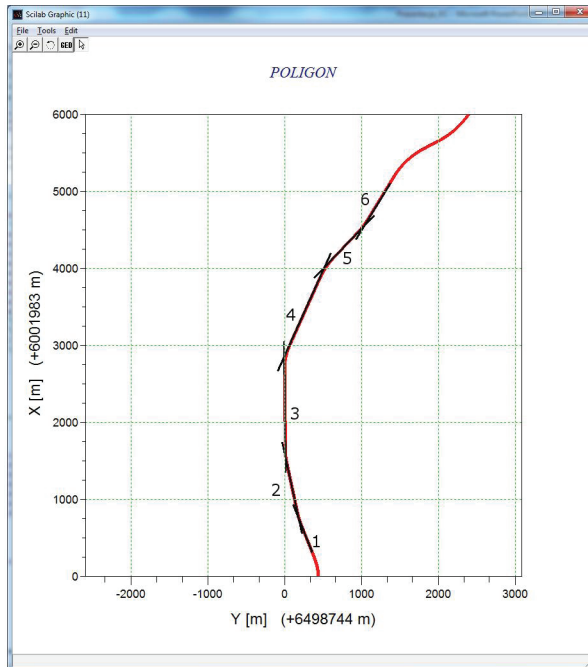
Tabela 1. Przykładowe dane wejściowe do modułu TRACK_POL (wygenerowane za pomocą modułu TRACK_STRAIGHT)

l_p	B	A [m]	R^2	Y_p [m]	Y_k [m]
1	-2,482	22133437,766	0,999999740	6499107,399	6499070,042
2	-4,636	36129408,555	0,999999650	6498897,022	6498876,108
3	-84,627	555972426,164	0,999835390	6498757,453	6498756,090
4	2,218	-8409312,297	0,999999840	6499006,231	6499047,082
5	1,052	-830026,295	0,999999880	6499451,213	6499656,936
6	1,631	-4591576,705	0,999999950	6499990,217	6500119,880

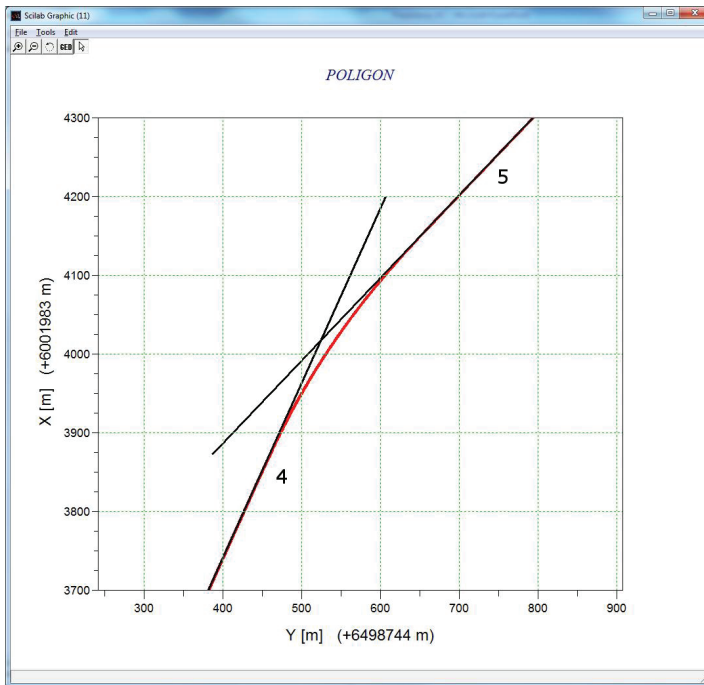
Po wczytaniu pliku z danymi użytkownik może już zbudować poligon poprzez wygenerowanie tablicy obliczającej współrzędne odpowiednich punktów, tj. początku i końca poligonu wraz z pośrednimi punktami wierzchołkowymi. Oprócz tych informacji otrzymujemy także kąty zwrotu trasy oraz długości odcinków pomiędzy kolejnymi wierzchołkami. Każda prosta identyfikowana jest przez program wg numeru porządkowego, który zostaje do niej przypisany w nazwie pliku, zawierającego współrzędne punktów wchodzących w zakres odcinka przy wyodrębnianiu przez projektanta odcinków prostych (jeszcze podczas pracy w module TRACK_VIS [4]). Zbudowana w sposób automatyczny tablica danych pozwala stworzyć wykres poligonu na tle punktów reprezentujących trasę, do których użytkownik ma dostęp z poziomu omawianego modułu. Widok trasy, dla której stworzono poligon kierunków głównych, pokazano na rysunku 3, natomiast fragment poligonu dla tejże trasy oraz zbliżenie na rejon zmiany kierunków głównych przedstawiają rysunki 4 i 5.



Rys. 3. Widok przebiegu trasy kolejowej w układzie współrzędnych 2000 uzyskany jako wynik ciągłych pomiarów satelitarnych



Rys. 4. Fragment poligonu kierunków głównych (proste 1-6 z tabeli 1) wygenerowany w module TRACK_POL



Rys. 5. Zbliżenie na rejon zmiany kierunku trasy pomiędzy prostą nr 4 i nr 5 z tabeli 1

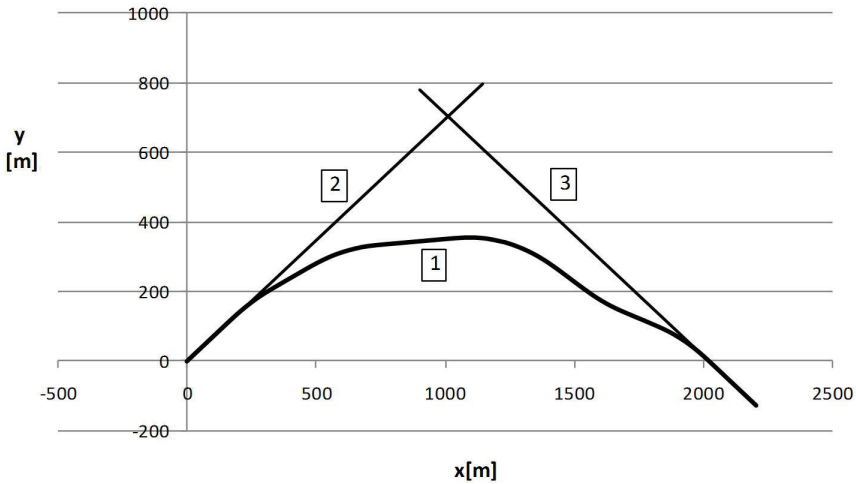
Praca z modułem TRACK_POL kończy się zapisem do pliku wynikowego wszystkich wygenerowanych informacji na temat stworzonego poligonu. Plik wynikowy staje się plikiem danych do kolejnych modułów przewidzianych w programie SATTRACK, tj. do modułu oceniającego odcinki nieliniowe położone w rejonach zmiany kierunków głównych trasy a docelowo do modułu służącego do projektowania trasy w płaszczyźnie poziomej.

5. Przygotowanie danych do oceny odcinków trasy położonych w łuku

Dysponując poligonem kierunków głównych możemy przygotować dane liczbowe dla modułu TRACK_ARC, służącego do oceny odcinków trasy położonych w łuku. Znamy bowiem dla każdego łuku równania obydwu przecinających się stycznych, współrzędne punktu przecięcia oraz kąt zwrotu trasy. Powinniśmy jeszcze oszacować wartość występującego promienia łuku kołowego R , a także długość tegoż łuku oraz

długości krzywych przejściowych. Sposób określenia tych wartości opisano w pracy [2].

W tym celu należy dokonać transformacji wybranego rejonu zmiany kierunku trasy (takiego jak pokazany na rysunku 5) do lokalnego układu współrzędnych x , y , co pozwoli na symetryczne ustawienie danego układu geometrycznego z naniesionymi kierunkami głównymi trasy [5]. Przykład efektów takiej operacji, przeprowadzonej dla innego niż pokazany na rys. 5 fragmentu układu geometrycznego, przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Przykładowy fragment trasy kolejowej w lokalnym układzie współrzędnych (w skali skażonej);
1 – istniejący przebieg trasy $y(x)$, 2 – wyznaczony kierunek główny trasy $y_1(x)$, 3 – wyznaczony kierunek główny trasy $y_2(x)$

Wzory na nowe współrzędne trasy w przesuniętym do punktu $O(Y_0, X_0)$ i obróconym o kąt β lokalnym układzie współrzędnych x , y opisują zależności [7]:

$$x = (Y - Y_0) \cos \beta + (X - X_0) \sin \beta \quad (5)$$

$$y = -(Y - Y_0) \sin \beta + (X - X_0) \cos \beta \quad (6)$$

Nowy początek układu współrzędnych przyjmujemy na prostej z lewej strony układu geometrycznego. Wybieramy odciętą Y_0 punktu trasy przed łukiem, znajdującego się w pobliżu prostej aproksymującej;

równanie prostej umożliwia nam wyznaczenie rzędnej X_0 . Wartości Y_0 i X_0 wyznaczają początek przesuniętego układu współrzędnych.

Ogólny wzór na kąt obrotu β jest następujący:

$$\beta = \varphi_1 + \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (7)$$

W przypadku zwrotu trasy w prawo, gdy kąt zwrotu $\alpha = \varphi_1 - \varphi_2 > 0$, po dokonaniu obrotu układu otrzymujemy dodatnie wartości rzędnej y . W przypadku zwrotu trasy w lewo, gdy kąt zwrotu $\alpha = \varphi_1 - \varphi_2 < 0$, wartości rzędnej y są ujemne; możemy jednak – dla celów praktycznych – dokonać ich lustrzanego odbicia względem osi x .

W nowym układzie współrzędnych proste aproksymujące są opisane następującymi zależnościami:

$$y_1(x) = \frac{A_1 - X_0 + B_1 \cdot Y_0}{B_1 \sin \beta \cdot \cos \beta} + \tan(\varphi_1 - \beta) \cdot x = \tan(\varphi_1 - \beta) \cdot x \quad (8)$$

$$y_2(x) = \frac{A_2 - X_0 + B_2 \cdot Y_0}{B_2 \sin \beta \cdot \cos \beta} + \tan(\varphi_2 - \beta) \cdot x \quad (9)$$

Dzięki pokazanemu na rysunku 6 przeniesieniu interesującego nas fragmentu trasy do lokalnego układu współrzędnych x , y możemy oszacować wartość promienia łuku kołowego, a także orientacyjne długości rzutów na oś x – łuku kołowego i krzywych przejściowych. W celu wyznaczenia wartości promienia R wykorzystamy wartość strzałki f_c , określonej w punkcie środkowym łuku, względem cięciwy l_c o zmieniającej się długości; wartości promienia R wyznacza się ze ścisłej zależności:

$$R = \frac{l_c^2}{8f_c} + \frac{f_c}{2} \quad (10)$$

6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono założenia opracowywanego obecnie programu komputerowego SATTRACK do wizualizacji, oceny i projektowania trasy kolejowej, dostosowanego do techniki ciągłych pomiarów satelitarnych. Zaprezentowany moduł TRACK_POL służy do tworzenia poligonu kierunków głównych trasy kolejowej.

Zastosowanie ciągłych pomiarów satelitarnych, z antenami zainstalowanymi na poruszającym się pojeździe szynowym, stwarza możliwość precyzyjnego określenia kierunków głównych trasy kolejowej w państwowym układzie odniesień przestrzennych 2000. Stwarza to możliwość tworzenia poligonu z przecinających się odcinków prostych.

Pokazano opis funkcjonowania programu oraz przykład jego zastosowania obejmujący nałożenie poligonu na kilkudziesięciokilometrowy odcinek pomierzonej satelitarnie linii kolejowej.

Wyjaśniono również zasady wykorzystania programu w celu przygotowania danych do oceny odcinków trasy położonych w łuku.

Literatura

- [1] Bosy J., Graszka W., Leonczyk M.: *ASG-EUPOS – the Polish contribution to the EUPOS project*. Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Berlin, Germany, 11-14 November 2008.
- [2] Koc W.: *Metoda projektowania rejonu zmiany kierunku trasy kolejowej*. Problemy Kolejnictwa 2011, zeszyt 152.
- [3] Koc W., Chrostowski P.: *Ocena odcinków prostych trasy kolejowej na podstawie pomiarów satelitarnych*. Przegląd Komunikacyjny 2011, nr 9-10.
- [4] Koc W., Chrostowski P.: *Wizualizacja przebiegu trasy kolejowej na podstawie pomiarów satelitarnych*. IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Projektowanie, Budowa i Utrzymanie Infrastruktury w Transporcie Szynowym INFRASZYN 2011”, Zakopane, 6-8 kwietnia 2011.
- [5] Koc W., Specht C.: *Wyniki pomiarów satelitarnych toru kolejowego*. Technika Transportu Szynowego 2009, nr 7-8.
- [6] Koc W., Specht C., Jurkowska A., Chrostowski P., Nowak A., Lewiński L., Bornowski M.: *Określanie przebiegu trasy kolejowej na drodze pomiarów satelitarnych*. II Konferencja Naukowo-Techniczna „Projektowanie, Budowa i Utrzymanie Infrastruktury w Transporcie Szynowym INFRASZYN 2009”, Zakopane, 22-24 kwietnia 2009.

- [7] Korn G.A., Korn T.M.: *Matematyka dla pracowników naukowych i inżynierów*. PWN, Warszawa 1983.
- [8] Somla J., Wajda S., Oruba A., Ryczywolski M., Leonczyk M., Bosa J.: *ASG-EUPOS w fazie testów*. Geodeta – Magazyn Geoinformacyjny 2007, nr 12 (151).
- [9] Specht C.: *System GPS*. Wydawnictwo BERNARDINUM, Pelplin, 2007.
- [10] Strona internetowa: <http://www.scilab.org> (The Free Platform for Numerical Computation).

DESIGNING OF THE RAIL TRACK'S GEOMETRICAL SYSTEMS WITH THE ADJUSTMENT FOR THE GPS SYSTEM

Summary

The next module of the computer programme SATTRACK carried out at Gdansk University of Technology for visualization, assessment and designing of the railway routes which is adjusted to the technic of continuous satellite measurements have been presented in the paper. The module is called TRACK_POL, and it is used to create the range of main directions of railway route. The coordinates saved in the text file are used to calculate their equalizations in domestic reference space frame 2000. Having calculated equalizations for all lines, you can define the coordinates of the main points of the route and the turning angle. The description of programme functioning and an example of its application have been given. The rules of programme usage to prepare data for assessment of the route sections located in the arc have been explained.

Keywords: railway track, GPS surveying, geometrical system, computer aided design