

## Zastosowanie mobilnych pomiarów satelitarnych w projektowaniu i eksploatacji dróg szynowych

Władysław KOC<sup>1</sup>, Cezary SPECHT<sup>2</sup>

### Streszczenie

W artykule przedstawiono podsumowanie kilkuletnich badań nad zastosowaniem mobilnych pomiarów satelitarnych w projektowaniu i eksploatacji dróg szynowych. Mobilne pomiary satelitarne polegają na objeździe trasy pojazdem szynowym z doczepionymi wagonami-platformami lub wózkami dwuosiowymi, na których zainstalowano odbiorniki GNSS (ang. *Global Navigation Satellite System*). Opisano przyjętą metodykę badawczą oraz przebieg pomiarów przeprowadzonych w torze kolejowym i tramwajowym. Podjęto kwestię dokładności pomiarów satelitarnych. Wykazano, że aktualnie optymalnym rozwiązaniem – zapewniającym maksymalną dokładność wyznaczenia współrzędnych GNSS podczas badań inwentaryzacyjnych tras szynowych – jest wykorzystanie dwusystemowej satelitarnej sieci geodezyjnej GPS / GLONASS (odpowiednio ang. *Global Positioning System* i ros. *GLObalnaja NAwigacionnaja SiStema*). Jednocześnie wskazano, że wyznaczenie współrzędnych istniejącej trasy w państwowym układzie odniesień przestrzennych 2000 technikami GNSS prowadzi do konieczności weryfikacji dotychczasowej metodyki projektowania. W artykule przedstawiono założenia nowej metody projektowania układów geometrycznych toru, dostosowanej do techniki pomiarów satelitarnych, w której rozwiązanie problemu projektowego polega na wyznaczeniu uniwersalnych równań opisujących całość układu geometrycznego. Znajomość współrzędnych pozwala również na identyfikację kształtu geometrycznego istniejącego toru. Opisano moduły opracowanego programu komputerowego SATTRACK do wizualizacji, oceny i projektowania trasy kolejowej, obejmujące wizualizację przebiegu trasy kolejowej, ocenę odcinków prostych trasy, tworzenie poligonu kierunków głównych, ocenę odcinków trasy położonych w łuku oraz określanie kształtu osi eksploatowanego toru kolejowego. Scharakteryzowano również problem oceny efektów regulacji osi toru.

**Słowa kluczowe:** pomiary geodezyjne GNSS, ocena dokładności, układ geometryczny toru, metoda projektowania, odtworzenie kształtu i regulacja osi toru

<sup>1</sup> Prof. dr hab. inż.; Politechnika Gdańska; e-mail: kocwl@pg.gda.pl.

<sup>2</sup> Prof. dr hab. inż.; Akademia Morska w Gdyni; e-mail: c.specht@geodezja.pl.

## 1. Wprowadzenie

Pozycyjne systemy radionawigacyjne stanowią istotny element zapewnienia bezpieczeństwa transportu lądowego, morskiego i lotniczego [36]. Dla każdej z aplikacji transportowych, zabezpieczanych przez tego typu systemy, powinny być ściśle określone wymagania w zakresie dokładności określenia pozycji obiektu, dostępności, niezawodności, ciągłości oraz strefy działania itp., zarówno w skali światowej jak i krajowej.

Dzięki zastosowaniu techniki GPS (ang. *Global Navigation Satellite System*) na niezmiernie podatny grunt do rozwoju natrafiła również nawigacja lądowa. Wyposażanie seryjnie produkowanych samochodów w zintegrowany system nawigacyjny, wsparty miernikami kierunku, prędkości, mapę wektorową oraz odbiornik GPS świadczy przyszłościowo o głównym kierunku komercyjnego rozwoju GNSS ze względu na praktycznie nieograniczony rynek konsumentów. Ten rodzaj aplikacji nie wymaga jednak dużej dokładności wyznaczania współrzędnych. Dotyczy to również satelitarnego określania położenia pociągów na trasie kolejowej.

Sytuacja wygląda zupełnie inaczej, jeśli chcemy na podstawie trajektorii ruchu pojazdu szynowego określać kształt geometryczny osi eksploatowanego toru. Wymagana dokładność pomiarów (czyli błąd pomiarowy) do celów projektowych powinna wynosić poniżej 1 cm, w diagnostyce zaś byłyby to pojedyncze milimetry. Przez długi czas w Polsce było to niemożliwe do osiągnięcia [2]. Dopiero w połowie 2008 roku, po uruchomieniu Aktywnej Sieci Geodezyjnej ASG-EUPOS [1], otworzyły się zupełnie nowe perspektywy w zakresie określania rzeczywistego położenia toru kolejowego. Już pierwsze pomiary z wykorzystaniem techniki pomiarowej GPS w wersji mobilnej, przeprowadzone w lutym 2009 roku przez zespół naukowy Politechniki Gdańskiej i Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni wykazały, że wykorzystanie tej techniki umożliwia bardzo precyzyjne określenie podstawowych danych do projektowania modernizacji linii kolejowej [19, 25]. Pozwala ona na odtworzenie kierunków prostych trasy (i określenie występujących na nich deformacji poziomych), a także rejonów zmiany kierunku trasy (kątowni zwrotu trasy, łuków kołowych i krzywych przejściowych).

Dzięki technice satelitarnej stało się możliwe odtworzenie w sposób bezpośredni, rzeczywistego kształtu toru w płaszczyźnie poziomej. Stanowiło to inspirację do podjęcia działań nad opracowaniem nowych metod projektowania, dostosowanych do techniki pomiarów satelitarnych [5, 6, 7]. W niniejszym artykule przedstawiono podsumowanie pięcioletnich badań nad zastosowaniem mobilnych pomiarów satelitarnych w projektowaniu i eksploatacji dróg szynowych.



## 2. Pomiary satelitarne torów kolejowych i tramwajowych

Przebieg i rezultaty pomiarów satelitarnych przeprowadzonych w torze kolejowym i tramwajowym przedstawiono w pracach [17, 18, 19, 24, 25, 34, 35, 37]. Po szczegółowej analizie warunków realizacji pomiarów w latach 2009–2010, zdecydowano się gruntownie zweryfikować dotychczasową metodykę badań, w wyniku czego zrezygnowano z realizacji pomiarów w czasie rzeczywistym przy wykorzystaniu sieci ASG-EUPOS (ze względu na stwarzaną przez tę sieć możliwość przeprowadzenia pomiarów z wykorzystaniem wyłącznie pojedynczego systemu, tj. systemu GPS [16]).

Prowadzone w latach 2009–2014 badania związane z inwentaryzacją oraz diagnostyką linii kolejowych i tramwajowych wykazały, że zasadniczymi kwestiami – wpływającym na możliwości realizacyjne kinematycznych pomiarów GNSS – są następujące grupy zagadnień:

- Systemy GNSS – obejmujące cechy funkcjonalne wykorzystywane w pomiarach satelitarnych systemów pozycyjnych, a w szczególności:
  - liczbę wykorzystywanych systemów GNSS,
  - aktualny stan liczbowy konstelacji każdego z systemów GNSS,
  - wartość ekwiwalentnego błędu pomiaru odległości użytkownika dla każdego z satelitów,
  - warunki geometryczne realizacji pomiarów mierzone wartością współczynników geometrycznych DOP (ang. *Dilution of Precision*).
- Sieci GNSS – charakterystyki eksploatacyjne wykorzystywanej aktywnej sieci geodezyjnej, które obejmują zasadniczo:
  - gęstość i równomierność pokrycia terenu,
  - rodzaj rozwiązania GNSS (GPS lub GPS / GLONASS),
  - rodzaje serwisów pozycyjnych (czasu rzeczywistego lub postprocessingu),
  - metody wyznaczania poprawek (FKP, VRS, MAC i in.),
  - pokrycie terenu przez sieci telekomunikacyjne dostępnych operatorów telefonii mobilnej,
  - realna przepustowość i pojemność sieci telefonii mobilnej.
- Odbiornik GNSS:
  - dokładność statyczna i dynamiczna,
  - częstotliwość wyznaczenia położenia,
  - dostępne rodzaje rozwiązań sieciowych GNSS,
  - jakość systemu odbiorczego telefonii mobilnej (jest to często niedostrzegalna przez typowego użytkownika cecha obejmująca przede wszystkim sprawność i czułość układu nadawczo-odbiorczego; poziom natężenia sygnału wejściowego na wejściu demodulatora poprawek, która jest funkcją BER – Bitowej Stopy Błędów).



- Platforma pomiarowa – stanowiąca bardzo istotny element zestawu pomiarowego, na której zamontowano odbiorniki GNSS; powinna charakteryzować się możliwością kompensacji deformacji torów mierzonej linii przez jej docisk do obu szyn. Wydaje się uzasadnionym, że w jej skład, poza odbiornikami, powinien wchodzić dodatkowo system inercyjny INS, zapewniający możliwość utrzymania ciągłości i wysokiej dokładności pomiaru w terenie osłoniętym (gdzie występuje brak odbioru sygnałów GNSS). Dodatkowe wyposażenie może stanowić również mobilny skaner laserowy o wysokiej częstotliwości i dokładności pomiarów (około 1 mln punktów/s, dokładność:  $1\div 2$  mm).
- Warunki terenowe – to obecnie główny element stanowiący o dokładności realizacji pomiarów GNSS w torze kolejowym. Skrajnie niekorzystnymi warunkami terenowymi wpływającymi na dostępność oraz dokładność pomiarów są: znaczna wysokość topocentryczna przesłon terenowych (obiektów) zlokalizowanych w otoczeniu mierzonego odcinka oraz ich rozmieszczenie – niekorzystne na naszych szerokościach geograficznych są przesłony od strony południowej.
- Stan techniczny drogi szynowej – może powodować pojawianie się dodatkowych drgań zestawu pomiarowego GNSS, będących wynikiem deformacji toków szynowych.

Zasadniczym działaniem decydującym o dokładności realizacji pomiarów GNSS w torze kolejowym w warunkach miejskich, jest niewątpliwie dążenie do maksymalizacji liczby systemów GNSS wykorzystywanych podczas pomiarów. Nie może budzić żadnych wątpliwości, że zastosowanie wyłącznie polskiej Aktywnej Sieci Geodezyjnej ASG-EUPOS, korzystającej jedynie z systemu GPS, nie jest tu rozwiązaniem optymalnym. Zwiększenie liczby wykorzystywanych systemów GNSS – również przez zastosowanie alternatywnych, niepublicznych sieci satelitarnych (np.: VRSNET, Leica SmartNet, TPI-NET pro i in.) – skutkuje wzrostem liczby wykorzystywanych satelitów, a w efekcie poprawą geometrii konstelacji, reprezentowanej przez współczynniki geometryczne DOP. Konkludując, można stwierdzić, że podczas prowadzonych pomiarów należy dążyć do wykorzystania możliwie jak największej liczby systemów GNSS. W tym kontekście trzeba pamiętać, że zwiększenie liczby pomiarów nawet o pojedynczego satelitę skutkuje dodatkowymi dwoma pomiarami pseudoodległości wykonanymi na dwóch częstotliwościach (nadmiarowa liczba obserwacji w rozwiązaniu wyrównawczym określenia współrzędnych), każdy z satelitów zaś wpływa na obniżenie wartości współczynników DOP podczas pomiaru.



### 3. Ocena dokładności pomiarów satelitarnych

Kwestię oceny dokładności pomiarów satelitarnych podejmowano w pracach [22, 29, 31, 33]. Prowadzone badania jednoznacznie potwierdziły konieczność wykorzystania odbiorników dwusystemowych GPS / GLONASS, umożliwiających maksymalizowanie dokładności określenia współrzędnych pozycji, szczególnie w terenie zurbanizowanym. Otwartym zagadnieniem było rozstrzygnięcie odnoszące się do zastosowania metod postprocessingowych względnie czasu rzeczywistego. Analizę porównawczą obu metod przeprowadzono w lutym 2012 r. oraz wrześniu 2013 roku na podstawie satelitarnych pomiarów inwentaryzacyjnych linii tramwajowych w Gdańsku. Na rysunkach 1 i 2 pokazano wykorzystywane zestawy pomiarowe.



Rys. 1. Zestawy pomiarowe wykorzystywane w 2012 roku



Rys. 2. Zestawy pomiarowe wykorzystywane w 2013 roku

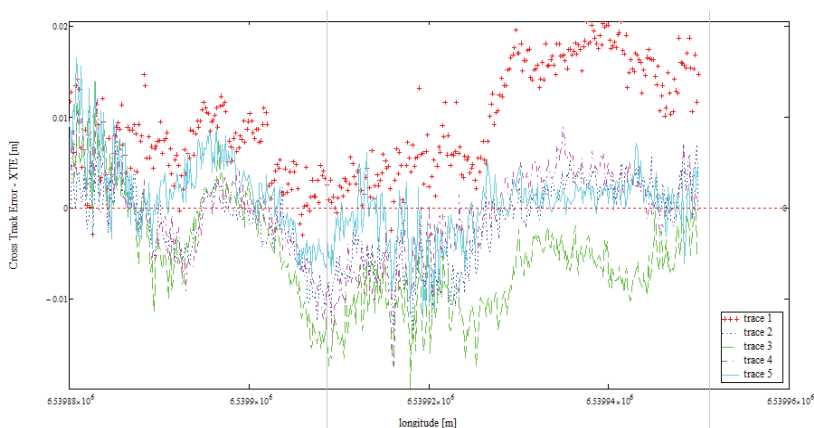
W roku 2012 inwentaryzację prowadzono za pomocą dwóch odbiorników Leica – GS 15 oraz GS 12 z kontrolerami CS-15. Taki układ pozwala na uzyskanie dokładności w trybie kinematycznym RTK (pomiar fazowy) w poziomie: 10 mm + 1 ppm (rms) oraz w pionie: 20 mm + 1 ppm (rms). W celu zwiększenia tej dokładności zdecydowano się na realizację badań z wykorzystaniem stacji referencyjnej Politechniki Gdańskiej do transmisji poprawek różnicowych GPS / GLONASS. Badania zrealizowano w postprocessingu z wykorzystaniem oprogramowania Leica-Geooffice. W dniach 20–21 września 2013 wykonano analogiczne pomiary wykorzystując ponownie dwa odbiorniki GNSS, które – w przeciwieństwie do poprzednich pomiarów – wykorzystywały aktywną sieć satelitarną Leica-SmatNet w czasie rzeczywistym, zapewniającą transmisję GPRS korekt dla dwusystemowego rozwiązania sieciowego GNSS.

W pomiarach wykonanych w lutym 2012 roku (GPS / GLONASS, postprocessing) na łączną liczbę 15 853 pomiarów, 15 841 ma dokładność (błąd pomiarowy) poniżej 10 m (2D), którą to wartość przyjęto jako granicę błędu grubego. Oznacza to, że 12 pomiarów (tj. 0,075%) uznano za odstające od pozostałych i nie uwzględniano ich w dalszych analizach. W przypadku pomiarów 3D, liczba 15 816 pomiarów spełnia przyjęte kryterium, co oznacza, że błędy grube dotyczą 25 pomiarów (tj. 0,158%). W pomiarach wykonanych we wrześniu 2013 roku (GPS / GLONASS, czas rzeczywisty, SmartNet) na łączną liczbę 189 368 pomiarów, 189 045 ma dokładność poniżej 10 m (2D). Oznacza to, że 323 pomiary (tj. 0,175%) uznano za odstające i nie uwzględniano w dalszych analizach. W przypadku pomiarów 3D 188 587 pomiarów spełnia przyjęte kryterium, co oznacza, że błędy grube dotyczą 781 pomiarów (tj. 0,412%).

Ocenę dokładności określenia współrzędnych pozycji w obu kampaniach pomiarowych wykonano na podstawie wyznaczanych przez odbiorniki wartości błędów średnich odnoszących się do pozycji 2D oraz 3D. W przeciwieństwie do pomiarów realizowanych w ubiegłych latach, gdzie najczęściej zakładano wartość graniczną błędu pozycji wynoszącą 5 cm, w rozważaniach dla metod dwusystemowych (GPS / GLONASS), analizy przeprowadzono dla błędu pozycji wynoszącego 1 cm w przestrzeni 2D oraz błędu pozycji 2 cm w przestrzeni 3D. Powodem takiego założenia był znaczny wzrost dokładności realizowanych badań, zaobserwowany podczas opracowania wyników. Dla przykładu, na rysunku 3 przedstawiono wyniki pomiarów współrzędnych płaskich dla odcinka torów tramwajowych o długości 70 m, który zmierzono pięciokrotnie. Zaobserwowane błędy średnie pozycji 2D wynosiły 6–8 mm, natomiast błędy średnie dla pozycji 3D nie przekraczały 1 cm.

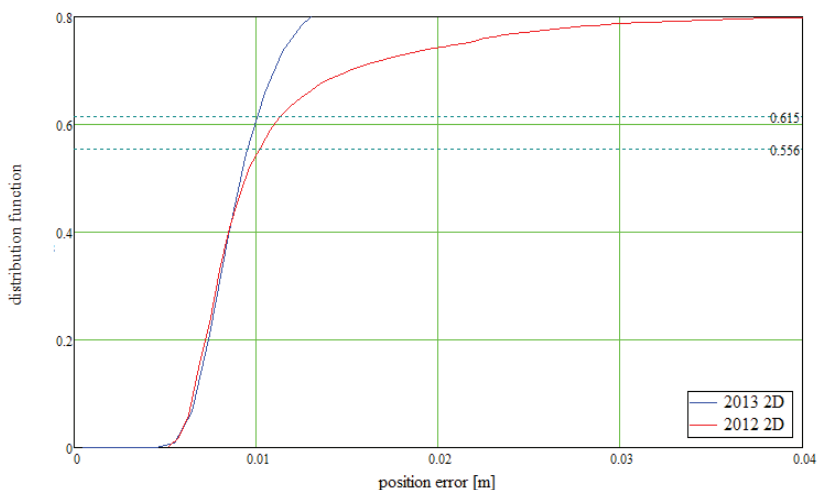




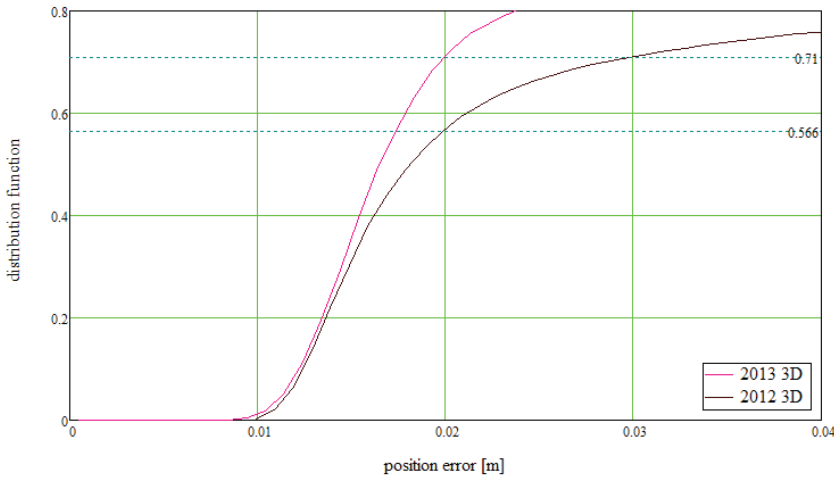


Rys. 3. Wyniki pomiarów odcinka torów tramwajowych o długości 70 m w Gdańsku

Przyjmując podane wcześniej wartości graniczne, na rysunkach 4 i 5 zaprezentowano dystrybuanty błędów średniej pozycji w pomiarach 2D i 3D dla obu kampanii pomiarowych.



Rys. 4. Dystrybuanty błędu średniego wyznaczenia pozycji 2D dla kampanii inwentaryzacyjnych tras tramwajowych w Gdańsku: z roku 2012 – postprocessing oraz z roku 2013 – czas rzeczywisty



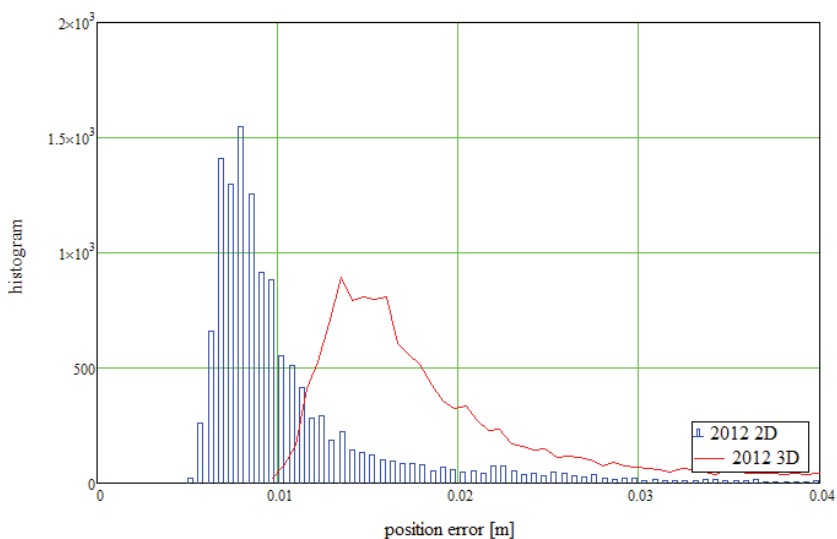
Rys. 5. Dystrybuanty błędu średniego wyznaczenia pozycji 3D dla kampanii inwentaryzacyjnych tras tramwajowych w Gdańsku: z roku 2012 – postprocessing oraz z roku 2013 – czas rzeczywisty

Analiza dokładności wyznaczenia współrzędnych pozycji 2D (rys. 4) wskazuje, że dla przyjętego progu 1 cm dostępność niższych wartości błędów średnich pozycji wynosiła 55,6% (postprocessing, pojedyncza stacja referencyjna), natomiast dla czasu rzeczywistego 61,5%. Należy również zauważyć znacząco różnicę obu funkcji, dowodzącą, że rozwiązanie sieciowe czasu rzeczywistego zapewnia wyższą dokładność niż postprocessing. Podobnie przedstawia się sytuacja w pomiarach 3D (rys. 5), gdzie za wartość progową przyjęto 2 cm. Dla tej wartości rozważane z poszczególnych kampanii dostępności, wynoszą odpowiednio 56,6% oraz 71%, przy podobnie wzrastającej różnicy pomiędzy wartościami obu funkcji.

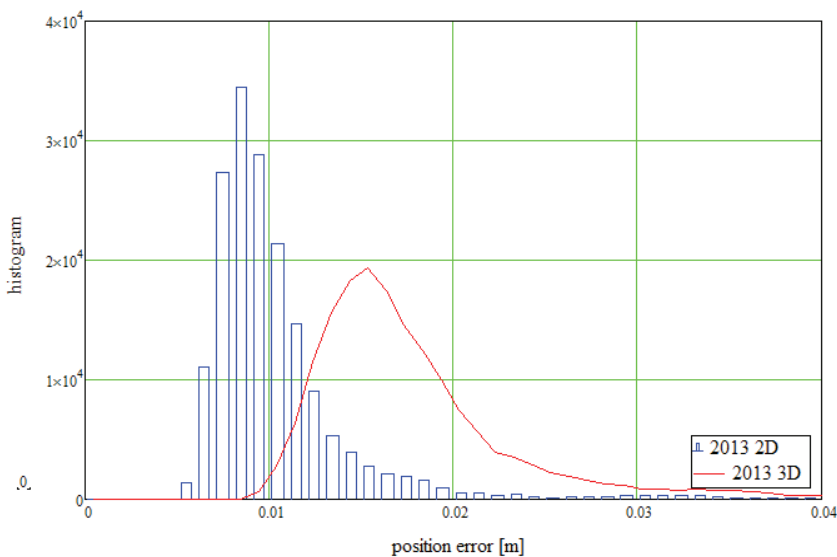
Pomimo znacznej różnicy w liczbie pomiarów, rozkład częstości występowania poszczególnych wielkości błędów średnich pozycji 2D i 3D umożliwia ocenę ich dyspersji. Zaprezentowano je w postaci histogramów na rysunkach 6 i 7. Porównanie tych histogramów dowodzi, że w 2012 roku liczba pomiarów o dokładności (tj. błędzie) przewyższającej 2 cm (względem liczności innych przedziałów) jest znacznie większa niż w badaniach zrealizowanych w 2013 roku (czasu rzeczywistego, z wykorzystaniem sieci SmartNet). Wniosek ten dotyczy zarówno badań w przestrzeni 2D, jak również 3D (krzywa z pomiarów z 2013 roku ma większe prawostronne nachylenie).

Przedstawione analizy błędów dowodzą, że optymalnym – zapewniającym maksymalną dokładność wyznaczenia współrzędnych – rozwiązaniem GNSS wykorzystywanym do pomiarów inwentaryzacyjnych oraz (w perspektywie) diagnostycznych dróg szynowych jest dwusystemowa satelitarna sieć geodezyjna GPS / GLONASS, gwarantująca również sieciowe rozwiązanie współrzędnych.





Rys. 6. Histogramy błędów określenia pozycji 2D i 3D dla kampanii pomiarowych zrealizowanych w 2012 roku



Rys. 7. Histogramy błędów określenia pozycji 2D i 3D dla kampanii pomiarowych zrealizowanych w 2013 roku



## 4. Projektowanie układów geometrycznych

Mobilne pomiary satelitarne umożliwiają wyznaczenie współrzędnych istniejącej trasy kolejowej w państwowym układzie odniesień przestrzennych 2000 [32]. W takiej sytuacji staje się sprawą oczywistą, że w tymże układzie powinny być wyznaczane również współrzędne nowo projektowanej osi toru, służące do wytyczenia trasy w terenie. Wymaga to zmiany dotychczasowej metodyki projektowania. Nowe metody projektowania układów geometrycznych toru, dostosowane do techniki pomiarów satelitarnych, zostały przedstawione m.in. w pracach [4, 5, 6, 7, 12].

Aby można było wykorzystywać uzyskane dane pomiarowe, należy interesujący nas rejon zmiany kierunku trasy wyodrębnić z całości układu geometrycznego oraz dokonać odpowiedniej transformacji (przesunięcia i obrotu) układu współrzędnych [19]. Najkorzystniej będzie, jeśli nowy układ współrzędnych  $x, y$  pozwoli na symetryczne ustawienie układu geometrycznego z naniesionymi kierunkami głównymi trasy (jak na rysunku 8). Obowiązują tutaj następujące zależności [30]:

$$x = (Y - Y_0) \cos \beta + (X - X_0) \sin \beta, \quad (1)$$

$$y = -(Y - Y_0) \sin \beta + (X - X_0) \cos \beta, \quad (2)$$

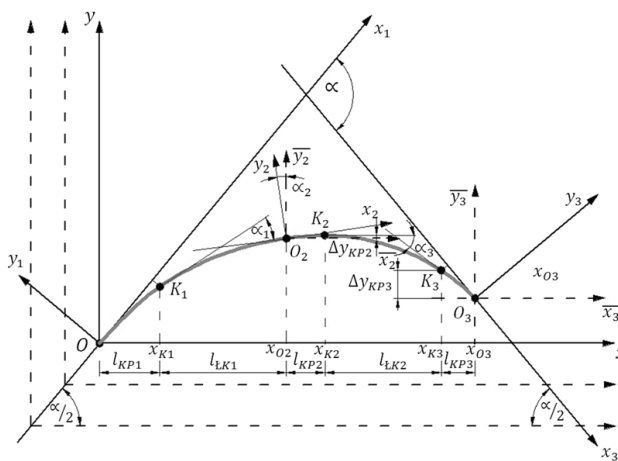
gdzie:  $Y$  – odcięta punktu pomiarowego w układzie 2000,

$X$  – rzędna punktu pomiarowego w układzie 2000,

$Y_0$  – odcięta początku lokalnego układu współrzędnych,

$X_0$  – rzędna początku lokalnego układu współrzędnych,

$\beta$  – kąt obrotu układu 2000.



Rys. 8. Całość projektowanego układu geometrycznego w lokalnym układzie współrzędnych



W przypadku rejonu zmiany kierunku trasy, projektowanie będzie najczęściej polegać na takim skorygowaniu promienia łuku kołowego oraz rodzaju i długości krzywych przejściowych, aby nowy układ geometryczny był jak najkorzystniejszy z punktu widzenia kinematyki ruchu pojazdów szynowych, a jednocześnie jego położenie w płaszczyźnie poziomej nie odbiegało zbyt od położenia istniejącego. Jak wykazały przeprowadzone dotąd pomiary satelitarne, kształt eksploatowanych torów kolejowych jest często tak zdeformowany, że określenie kierunków głównych okazuje się niemożliwe; nie można więc podczas projektowania zastosować modelowego układu: krzywa przejściowa – łuk kołowy – krzywa przejściowa. Jedynym rozwiązaniem staje się wówczas wprowadzenie do układu geometrycznego dwóch łuków kołowych o różnym promieniu, czyli zastosowanie łuku koszowego [7]. Mamy tutaj do czynienia z uogólnieniem przypadku zarówno symetrycznego, jak też niesymetrycznego sposobu rozwiązania problemu; łuk koszowy można bowiem łatwo sprowadzić do jednego łuku kołowego o ustalonym promieniu.

W prezentowanej metodzie projektowanie nowego układu geometrycznego odbywa się w lokalnym układzie współrzędnych  $x, y$  (rys. 8). Najbardziej istotnym elementem nowej procedury jest to, że rozwiązanie problemu projektowego polega na wyznaczeniu uniwersalnych równań opisujących całość układu geometrycznego. Tworzenie kolejnych wariantów przebiegu trasy odbywa się zatem nie za pomocą techniki graficznej (np. z wykorzystaniem programu AutoCad), lecz przez wprowadzanie do odpowiednich formuł matematycznych kolejnych wartości projektowych (promieni łuków i długości krzywych przejściowych). Tworzenie zapisu analitycznego odbywa się sekwencyjnie, obejmując kolejne fragmenty układu geometrycznego trasy: pierwszą krzywą przejściową ( $KP1$  – odcinek  $OK_1$ ), pierwszy łuk kołowy ( $ŁK1$  – odcinek  $K_1O_2$ ), drugą krzywą przejściową ( $KP2$  – odcinek  $O_2K_2$ ), drugi łuk kołowy ( $ŁK2$  – odcinek  $K_2K_3$ ) oraz trzecią krzywą przejściową ( $KP3$  – odcinek  $K_3O_3$ ). Podstawową przyjętą zasadę stanowi zachowanie zgodności stycznych w miejscach połączeń poszczególnych elementów geometrycznych.

Szybkie generowanie kolejnych wariantów umożliwił opracowany program komputerowy [12]. Po zakończeniu procesu projektowania, czyli dokonaniu wyboru wariantu do realizacji, dokonujemy transformacji tegoż wariantu do układu 2000, wykorzystując wzory 3 i 4 według [30]:

$$Y = Y_0 + x \cos \beta - y(x) \sin \beta, \quad (3)$$

$$X = X_0 + x \sin \beta + y(x) \cos \beta. \quad (4)$$



## 5. Określanie kształtu geometrycznego toru

Metodykę określania kształtu geometrycznego toru na podstawie pomiarów satelitarnych omówiono w pracach [9, 10, 11, 13, 14, 15, 20, 21]. W Katedrze Transportu Szynowego Politechniki Gdańskiej opracowano program komputerowy SATTRACK do wizualizacji, oceny i projektowania trasy kolejowej, dostosowany do techniki mobilnych pomiarów satelitarnych. Pierwsza wersja programu została napisana w języku skryptowym programu Scilab [38]. W pełni darmowy dostęp do pakietu sprawia, że jest on powszechnie preferowany przez programistów.

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

- 1) wizualizację przebiegu trasy kolejowej (moduł TRACK\_VIS),
- 2) ocenę odcinków prostych trasy (moduł TRACK\_STRAIGHT),
- 3) tworzenie poligonu kierunków głównych (moduł TRACK\_POL),
- 4) ocenę odcinków trasy położonych w łuku (moduł TRACK\_ARC),
- 5) określanie kształtu osi eksploatowanego toru kolejowego (moduł TRACK\_DESIGN).

### 5.1. Wizualizacja przebiegu trasy kolejowej

Pomiary satelitarne stwarzają możliwość oceny jakościowej przebiegu trasy kolejowej na podstawie uzyskanego zbioru współrzędnych  $Y_i, X_i$  punktów trasy w państwowym układzie odniesień przestrzennych 2000. Służy temu moduł TRACK\_VIS [13, 21]. Program ten realizuje następujące funkcje:

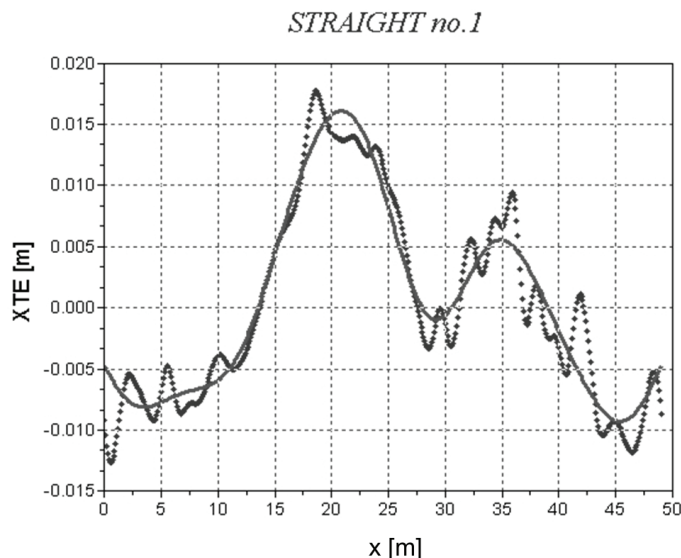
- automatyczne wyznaczanie położenia pomierzonych punktów trasy na jej długości (w odniesieniu do kilometrażu punktu początkowego),
- przedstawienie współrzędnych  $Y_i, X_i$  punktów trasy na siatce układu współrzędnych prostokątnych,
- podawanie informacji o orientacyjnym kilometrażu dowolnego miejsca na trasie (na podstawie wprowadzonej jego odciętej  $Y$  lub rzędnej  $X$ ),
- wydzielenie wybranego fragmentu trasy i jego powiększenie,
- tworzenie odrębnych plików zawierających dane dla wybranego fragmentu trasy.

W celu uzyskania lepszej przejrzystości na osiach współrzędnych i uniknięcia konieczności operowania dużymi wartościami (występującymi w państwowym układzie odniesień przestrzennych 2000), program dokonuje przesunięcia początku układu współrzędnych do punktu odpowiadającego najmniejszej wartości rzędnej  $X$  i najmniejszej wartości odciętej  $Y$ . Opcja ta pozwala również na powiększanie wybranych fragmentów trasy w celu bliższego przyjrzenia się odpowiednim rejonom.



## 5.2. Ocena odcinków prostych trasy

Pomierzone współrzędne prostej wykorzystuje się do wyznaczenia – metodą najmniejszych kwadratów – jej równania w układzie  $Y, X$  w postaci  $X = A + B Y$ . Odbywa się to w module TRACK\_STRAIGHT [9, 21]. W celu przeprowadzenia oceny rzeczywistego kształtu toru na danej prostej, dokonujemy jej transformacji do układu lokalnego [19]. W wyniku tej operacji otrzymujemy pewien sygnał w układzie, w którym pozioma oś stanowi kierunek zgodny z osią toru na odcinku prostym. W związku z tym, na osi pionowej wartości różne od zera stanowią odchylenie sygnału GPS od kierunku mierzonej trasy (tzw.  $XTE$  – Cross Track Error). Otrzymany sygnał należy poddać analizie w celu sprawdzenia możliwości odfiltrowania pewnych składowych [22], które można uznać jako spowodowane zjawiskami pobocznymi, nie mającymi bezpośredniego związku z kształtem mierzonego toru. Rezultat końcowy filtrowania sygnału można traktować jako obraz rzeczywistego kształtu toru. Istniejący kształt toru na prostej, mogący stanowić podstawę do określenia zbioru wartości wymaganych przesunięć poprzecznych (do projektu regulacji geometrycznej osi toru) pokazano na rysunku 9.



Rys. 9. Uzyskany hipotetyczny kształt toru (linia ciągła) na odcinku prostym przy wartości odcięcia 0,1/m (w skali skażonej)

W analizie sygnału pomiarowego częstotliwości wykorzystano tzw. dyskretną transformację Fouriera ciągu próbek pomiarowych. Uznano, że warunkom rzeczywistej pracy toru najbardziej odpowiada wartość odcięcia 0,1/m.

### 5.3. Tworzenie poligonu kierunków głównych

Rezultatem wykorzystania modułu TRACK\_STRAIGHT jest zestaw danych wejściowych do wygenerowania poligonu kierunków głównych analizowanego odcinka trasy kolejowej (w module TRACK\_POL [11, 21]). Dane te są obliczane automatycznie w trakcie analizowania konkretnych odcinków. Do pliku zapisywane są ostatecznie 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 są wykorzystywane 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 wyznaczane przez współrzędne wierzchołków tworzonego przez te odcinki wieloboku. Zbudowana w sposób automatyczny tablica danych pozwala stworzyć wykres poligonu na tle punktów reprezentujących trasę. Praca z programem TRACK\_POL kończy się zapisaniem do pliku wynikowego wszystkich wygenerowanych informacji na temat stworzonego poligonu.

### 5.4. Ocena odcinków trasy położonych w łuku

Moduł SAT\_ARC [10, 21] pozwala na zlokalizowanie i identyfikację łuków kołowych przez wyodrębnienie ich z całości układu geometrycznego. Wyodrębniony rejon trasy przedstawia się w sposób standardowy, w lokalnym układzie współrzędnych, w którym oba kierunki główne nachylone są do osi poziomej pod tym samym kątem. W celu wstępnego oszacowania wartości promienia  $R$ , program umożliwia prezentację tej wartości, obliczanej z zależności pomiędzy promieniem a strzałką łuku kołowego dla zmiennej długości cięciwy. Taka informacja pozwala na szybkie zlokalizowanie łuku kołowego w nieliniowej sekcji analizowanego fragmentu trasy. Dodatkowo użytkownik dostaje graficzną informację, z której można odczytać średnią wartość promienia łuku.

Ostateczne wyznaczenie wartości promienia  $R$  odbywa się przez generowanie wykresu wskaźnika  $\Delta y$  zdefiniowanego, jako różnica rzędnych pomierzonych i rzędnych teoretycznych identyfikowanego łuku kołowego.

### 5.5. Określenie kształtu osi eksploatowanego toru kolejowego

Odtwarzanie kształtu osi toru kolejowego jest niewątpliwie zagadnieniem bardziej złożonym niż projektowanie wariantu docelowego. Mogą się tutaj okazać przydatne algorytmy obliczeniowe obejmujące trudniejsze przypadki geometryczne.



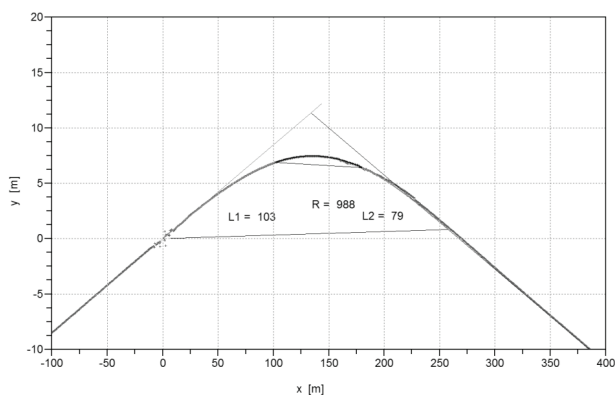


W module TRACK\_DESIGN [8, 21] wykorzystywane są te same algorytmy obliczeniowe, które stosuje się w projektowaniu układów geometrycznych (omówionym w rozdziale 4). Program ten generuje kolejne warianty przebiegu trasy, co pozwala na dokonanie wyboru rozwiązania najlepiej opisującego kształt istniejącej osi toru. Umożliwia on:

- szybkie zaprojektowanie poprawnego układu geometrycznego łączącego dwa kierunki główne,
- szybką ocenę wygenerowanego układu geometrycznego, szczególnie w przypadku, gdy projekt dotyczy modernizacji istniejącej linii,
- tworzenie dowolnej liczby wariantów, stosując różne rodzaje i długości krzywych przejściowych, a także poprzez zmianę wartości promienia łuku kołowego,
- wygenerowanie tablicy zawierającej współrzędne geograficzne punktów z określonym krokiem wzdłuż osi toru, niezbędnych do wytyczenia zaprojektowanego przebiegu trasy w terenie.

Właściwe projektowanie polega na generowaniu kolejnych wariantów i jest w dużym stopniu zautomatyzowane, przez co rola projektanta polega głównie na podejmowaniu krytycznych decyzji. Wspomaganie komputerowe przenosi zatem wysiłek związany z czynnościami obliczeniowymi oraz prezentacyjnymi na proces decyzyjny.

Na rysunku 10 pokazano rozwiązanie uzyskane po przyjęciu promienia  $R = 988$  m i dwóch krzywych w postaci klotoidy o długościach  $l_1 = 103$  m i  $l_2 = 79$  m. W celu podniesienia czytelności układu, początki i końce obydwu krzywych przejściowych połączono ze sobą liniami prostymi.



Rys. 10. Wariant połączenia dwóch kierunków głównych łukiem kołowym o promieniu  $R = 988$  m oraz dwiema krzywymi przejściowymi o długościach  $l_1 = 103$  m i  $l_2 = 79$  m (w skali skażonej; początki i końce obydwu krzywych przejściowych połączono ze sobą liniami prostymi)



Wartości różnic rzędnych nowo zaprojektowanych i istniejących w zakresie odciętych  $x$  (opisujących zaprojektowany łuk kołowy) użytkownik ocenia na wykresie towarzyszącym aktualnemu wariantowi. Różnice  $\Delta y$  stanowią pomocny wskaźnik przy podejmowaniu decyzji dotyczącej danego wariantu podczas projektowania.

Gdy użytkownik zakończy proces generowania wariantów przebiegu trasy, program dostarcza tablicę współrzędnych punktów rozmieszczonych wzdłuż zaprojektowanego układu geometrycznego. Punkty te stanowią opis projektowanej trasy w państwowym systemie odniesień przestrzennych 2000. Dodatkowo istnieje możliwość wydrukowania raportu zawierającego analityczny zapis przyjętego rozwiązania w lokalnym układzie współrzędnych  $x, y$ . Zawarte w raporcie dane pozwalają odtworzyć w dowolnym czasie wartości współrzędnych zaprojektowanej trasy w układzie 2000.

## 6. Ocena efektów regulacji osi toru

Z badań przeprowadzonych w Europie w latach 2006–2010 w ramach programu INNOTRACK [39], w których wzięło udział ponad 30 partnerów programu (w tym 8 czołowych zarządców infrastruktury – m.in. Wielka Brytania, Niemcy i Francja) okazało się, że w wykazie najczęściej zgłaszanych problemów na czele znalazło się hasło *bad track geometry*. Dotychczas stosowane metody kształtowania geometrycznego torów okazują się więc nieskuteczne. Mobilne pomiary satelitarne również potwierdziły występowanie wielu nieprawidłowości w ukształtowaniu torów kolejowych w płaszczyźnie poziomej. Jako przyczynę istniejącej niekorzystnej sytuacji wskazano stosowaną przez wiele lat metodykę regulacji osi toru. Należy przy tym zaznaczyć, że w literaturze brakuje na ten temat publikacji o charakterze naukowym – w zasadzie można tam znaleźć głównie materiał informacyjno-reklamowy [3, 40, 41, 42].

W celu oceny skuteczności omawianego procesu, przeprowadzono dwie kampanie mobilnych pomiarów satelitarnych [27, 28]. Pierwsza kampania pomiarowa miała na celu identyfikację stanu istniejącego, druga zaś – określenie ukształtowania toru po przeprowadzonej regulacji jego osi przez specjalistyczną firmę geodezyjną. Ponieważ projekt regulacji wykonano za pomocą tradycyjnych metod, stworzyło to możliwość oceny poprawności tychże metod z punktu widzenia aktualnego stanu wiedzy.

W analizie uzyskanych wyników wykorzystano metodykę odtwarzania kształtu osi toru, omówioną w punkcie 5.5. Okazało się, że porównując różnice wartości projektowanych względem stanu istniejącego oraz wartości po regulacji względem tegoż stanu, trudno byłoby wskazać wyraźne korzyści wynikające z zaprojektowanego układu geometrycznego; dotyczy to również efektu końcowego



procesu regulacji osi toru. Porównując dane projektowe ze stanem początkowym, w większości przypadków można zaobserwować niekorzystne zmiany parametrów geometrycznych (skrócenie krzywych przejściowych, zmniejszenie promieni łuków kołowych) lub też zmiany bardzo mało istotne.

Reasumując można powiedzieć, że wykonany przy zastosowaniu tradycyjnej procedury projekt w zasadzie nie wnosił nic nowego, dostosowując się całkowicie do stanu istniejącego. Natomiast po realizacji, zgodność z projektem zachowała jedynie część spośród analizowanych przypadków. Dysponując danymi z mobilnych pomiarów satelitarnych można przedstawiony problem rozwiązać w zupełnie inny sposób, stosując metodę projektowania opisaną w rozdziale 4. Stosowanie metod analitycznych umożliwiłoby racjonalne ustalenie nowych parametrów geometrycznych.

Jednocześnie należy się spodziewać, że wprowadzona ostatnio na PKP modyfikacja metodyki przeprowadzania regulacji osi toru [40] spowodowała postęp w omawianej dziedzinie. Wymagałoby to jednak sprawdzenia i do tego celu technika mobilnych pomiarów satelitarnych byłaby również bardzo użyteczna.

## 7. Podsumowanie

1. Opracowana przez interdyscyplinarny zespół naukowy Politechniki Gdańskiej i Akademii Morskiej w Gdyni metoda mobilnych pomiarów satelitarnych GNSS pozwala na precyzyjne odwzorowanie elementów geometrycznych drogi szynowej. Uzyskiwana dokładność okazała się w zupełności wystarczająca dla celów projektowych.
2. Do wyjaśnienia pozostaje nadal kwestia zastosowania mobilnych pomiarów satelitarnych w diagnozowaniu geometrii toru. W pracy [33] określono wartości różnic pomierzonego kształtu toru w kilku seriach pomiarowych. Przyjmując dla tych różnic rozkład Weibulla, uzyskano wartość oczekiwaną dla płaszczyzny poziomej równą 2,6 mm, a dla płaszczyzny pionowej 4,3 mm; są to stwierdzenia bardzo obiecujące.
3. Prowadzone przez lata badania dowodzą, że optymalnym rozwiązaniem – zapewniającym maksymalną dokładność wyznaczenia współrzędnych GNSS podczas badań inwentaryzacyjnych dróg szynowych – jest dwusystemowa satelitarna sieć geodezyjna GPS / GLONASS zapewniająca sieciowe rozwiązanie współrzędnych.
4. Przedstawiona nowa koncepcja sposobu projektowania rejonu zmiany kierunku trasy, dostosowana do techniki pomiarów satelitarnych, prowadzi do uzyskania rozwiązania analitycznego, z zastosowaniem odpowiednich formuł matematycznych. Wykorzystanie odpowiedniego algorytmu obliczeniowego w opracowanym systemie wspomagania komputerowego daje możliwość natychmiastowego generowania zestawu współrzędnych projektowanej trasy, praktycznie



w nieograniczonej liczbie wariantów. W takiej sytuacji podstawowym problemem staje się już tylko kwestia wyboru rozwiązania najkorzystniejszego. Omawiana metoda znajduje również zastosowanie przy identyfikacji kształtu istniejącej trasy oraz regulacji osi toru.

## Literatura

1. Bosy J., Graszka W., Leonczyk M.: *ASG-EUPOS – A multifunctional precise satellite positioning system in Poland*. European Journal of Navigation 2007, nr 4.
2. Gocał J., Strach M.: *RTK w zastosowaniach inżynierskich – odbiorniki GPS na torach*. Geodeta – Magazyn Geoinformacyjny 2004, nr 5.
3. Jamka M., Lisowski S., Strach M.: *Zastosowanie współczesnych technologii geodezyjnych w określaniu geometrii toru w aspekcie dopuszczalnych prędkości pociągów*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP Oddział w Krakowie, seria: Materiały Konferencyjne, nr 91 (z. 149, Kraków 2009).
4. Koc W.: *Analytical method of modelling the geometric system of communication route*. Mathematical Problems in Engineering, vol. 2014, Article ID 679817, 2014.
5. Koc W.: *Design of rail-track geometric systems by satellite measurement*. Journal of Transportation Engineering 2012, vol. 138, no. 1 © ASCE.
6. Koc W.: *Metoda projektowania rejonu zmiany kierunku trasy kolejowej*. Problemy Kolejnictwa 2011, z. 152.
7. Koc W.: *Projektowanie łuków koszowych dostosowane do pomiarów satelitarnych*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, seria Transport, 2013, z. 98.
8. Koc W., Chrostowski P.: *Computer-aided design of railroad horizontal arc areas in adapting to satellite measurements*. Journal of Transportation Engineering 2014, vol. 140, no. 3 © ASCE.
9. Koc W., Chrostowski P.: *Ocena odcinków prostych trasy kolejowej na podstawie pomiarów satelitarnych*. Przegląd Komunikacyjny 2011, nr 9–10.
10. Koc W., Chrostowski P.: *Ocena trasy kolejowej położonej w łuku na podstawie pomiarów satelitarnych*. Przegląd Komunikacyjny 2013, nr 4.
11. Koc W., Chrostowski P.: *Tworzenie poligonu kierunków głównych trasy kolejowej z wykorzystaniem pomiarów GPS*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP Oddział w Krakowie, seria: Materiały Konferencyjne, nr 96 (z. 158), Kraków 2011.
12. Koc W., Chrostowski P.: *Uniwersalny program komputerowy do projektowania zmiany kierunku trasy*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia



- Inżynierów i Techników Komunikacji RP Oddział w Krakowie, seria: Materiały Konferencyjne, nr 3 (z. 102), Kraków 2013.
13. Koc W., Chrostowski P.: *Wizualizacja przebiegu trasy kolejowej na podstawie pomiarów satelitarnych*. IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Projektowanie, Budowa i Utrzymanie Infrastruktury w Transporcie Szynowym INFRA-SZYN 2011”, Zakopane 2011.
  14. Koc W., Chrostowski P., Palikowska K.: *Odtwarzanie przebiegu trasy kolejowej o złożonym ukształtowaniu geometrycznym*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP Oddział w Krakowie, seria: Materiały Konferencyjne, nr 3 (z. 102), Kraków 2013.
  15. Koc W., Chrostowski P., Palikowska K.: *Program komputerowy do odtwarzania osi toru kolejowego*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP Oddział w Krakowie, seria: Materiały Konferencyjne, nr 2 (z. 101), Kraków 2013.
  16. Koc W., Chrostowski P., Szmagliński J., Specht C.: *Ocena kształtu geometrycznego torów tramwajowych na podstawie pomiarów satelitarnych*. Problemy Kolejnictwa 2014, tom 58, z. 162.
  17. Koc W., Specht C.: *Application of the Polish active GNSS geodetic network for surveying and design of the railroad*. First International Conference on Road and Rail Infrastructure – CETRA 2010, Opatija, Croatia, 2010.
  18. Koc W., Specht C.: *Selected problems of determining the course of railway routes by use of GPS network solution*. Archives of Transport 2011, vol. XXIII, issue 3.
  19. Koc W., Specht C.: *Wyniki pomiarów satelitarnych toru kolejowego*. Technika Transportu Szynowego 2009, nr 7–8.
  20. Koc W., Specht C., Chrostowski P.: *Finding deformation of the straight rail track by GNSS measurements*. Annual of Navigation 2012, no. 19, part 1.
  21. Koc W., Specht C., Chrostowski P.: *The application effects of continuous satellite measurements of railway lines*. Conference Papers of 12th International Conference & Exhibition RAILWAY ENGINEERING–2013, London, United Kingdom, 2013, Railway Operation Section, CD-ROM.
  22. Koc W., Specht C., Chrostowski P., Palikowska K.: *The accuracy assessment of determining the axis of railway track basing on the satellite surveying*. Archives of Transport 2012, vol. XXXIV, no. 3.
  23. Koc W., Specht C., Chrostowski P., Szmagliński J.: *Ekonomiczne aspekty zastosowania techniki mobilnych pomiarów satelitarnych przy regulacji osi toru*. Logistyka 2014, nr 3, CD-ROM.
  24. Koc W., Specht C., Chrostowski P., Szmagliński J.: *Możliwości satelitarnej oceny położenia geometrycznego tramwajowych węzłów rozjazdowych*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komu-



- nikacji RP Oddział w Krakowie, seria: Materiały Konferencyjne, nr 2 (z. 101), Kraków 2013.
25. Koc W. et al.: *Określanie przebiegu trasy kolejowej na drodze pomiarów satelitarnych*. II Konferencja Naukowo-Techniczna „Projektowanie, Budowa i Utrzymanie Infrastruktury w Transporcie Szynowym INFRASZYN 2009”, Zakopane, 2009.
  26. Koc W., Specht C., Lewiński L., Chrostowski P.: *Regulacja osi toru w warunkach pomiarów satelitarnych (program badań)*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP Oddział w Krakowie, seria: Materiały Konferencyjne, nr 95 (z. 154), Kraków 2010.
  27. Koc W., Specht C., Lewiński L., Chrostowski P., Grzejka P.: *Ocena efektów regulacji osi toru na wybranej linii kolejowej*. Technika Transportu Szynowego 2013, nr 2-3.
  28. Koc W. et al.: *Ocena skuteczności stosowanej metodyki regulacji osi toru kolejowego*. Przegląd Komunikacyjny 2013, nr 10.
  29. Koc W. et al.: *Wstępne wyniki badań dostępności sieci ASG-EUPOS podczas inwentaryzacji trasy kolejowej KOŚCIERZYNA – KARTUZY*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, tom 19, 2009.
  30. Korn G.A., Korn T.M.: *Matematyka dla pracowników naukowych i inżynierów*. PWN, Warszawa 1983.
  31. Oszczak S., Specht C., Koc W.: *Próba oceny dokładności pomiarów satelitarnych toru kolejowego*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP Oddział w Krakowie, seria: Materiały Konferencyjne, nr 91 (z. 149), Kraków 2009.
  32. Specht C.: *System GPS*. Wydawnictwo BERNARDINUM, Pelplin 2007.
  33. Specht C., Koc W., Chrostowski P., Szmagliński J.: *Ocena dokładności mobilnych pomiarów satelitarnych toru w płaszczyźnie poziomej i pionowej*. Projektowanie, Budowa i Utrzymanie Infrastruktury w Transporcie Szynowym INFRASZYN 2014. Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2014.
  34. Specht C., Koc W., Nowak A., Szmagliński J.: *Ciągłe pomiary satelitarne na układzie linii tramwajowych w Gdańsku*. Technika Transportu Szynowego 2013, nr 2-3.
  35. Specht C. et al.: *Dostępność fazowych rozwiązań GPS/ Glonass podczas geodezyjnej inwentaryzacji dróg szynowych – na przykładzie linii tramwajowej Gdańska*, Technika Transportu Szynowego 2012, nr 9, CD-ROM.
  36. Specht C., Koc W., Oszczak S.: *Polski plan radionawigacyjny jako istotny czynnik wpływający na bezpieczeństwo w transporcie*. Logistyka 2014, nr 3, CD-ROM.
  37. Specht C., Nowak A., Koc W., Jurkowska A.: *Application of the Polish Active Geodetic Network for railway track determination*. Transport Systems and





- Processes – Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, CRC Press – Taylor & Francis Group, London 2011.
38. Strona internetowa: [www.scilab.org](http://www.scilab.org).
39. Strona internetowa: [www.innotrack.net](http://www.innotrack.net).
40. Szczęsny J., Jakimowicz M., Kwiatkowski A., Jankowski M.: *Od pomiarów do realizacji – nowoczesne technologie w procesie regulacji osi torów*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji RP Oddział w Krakowie, seria: Materiały Konferencyjne, nr 3 (z. 102), Kraków 2013.
41. Wenty R.: *Machines and technology for high-capacity lines*. European Railway Review 2006, issue 2.
42. Wenty R.: *Plasser & Theurer machines and technologies applied for track maintenance of high-speed railway lines: a selection*. Rail Engineering International 2007, no. 1.



## Application of the Mobile Satellite Measurements in the Design and the Exploitation of Railway Lines

### Summary

The article presents a summary of several years research of mobile satellite measurements in designing and exploitation of railway lines. Mobile satellite measurements consist of crossing railway and tram routes with a power car and outboard cars or two-axle bogies, on the top of them GNSS (Global Navigation Satellite System) receivers are installed. The adopted research methodology and the measurements carried out in the rail and tram track are described. The accuracy of satellite measurements is also the issue of the analysis. It was proven that the optimal solution with maximum accuracy of determining the coordinates GNSS during the inventory of railway routes is currently the use of the Global Positioning System (in Russian: GLObalnajaNAwigacionnajaSiStema). Simultaneously, it is noted that the determination of the existing routes coordinates in the national reference system 2000 with the use of GNSS techniques leads to the need of verifying the existing designing methodology. The paper presents an assumptions of a new method of railway geometrical layout designing adapted to the techniques of satellite measurements. To resolve the designing issue, the universal system of equations describing the entire geometrical layout is determined. Furthermore, the identification of the geometrical layout of the existing track is enabled by the knowledge of the coordinates. The modules of ongoing software SATTRACK are described. This computer program is made to visualize, assess and design the railway layout. Moreover, it includes visualization of railway route planning, the evaluation of track straight sections, creating a major a polygon directions, evaluation of curved sections and the determination of the exploited railway track axis shape. The assessment of the railway track axis regulation effects are also a subject of the paper.

**Keywords:** GNSS geodetic measurements, accuracy assessment, track geometrical layout, designing method, identification of the track shape, track axis regulation



## Применение мобильных спутниковых измерений при проектировании и эксплуатации железных дорог

### Резюме

В статье представлен итог многолетних исследований в области применения мобильных спутниковых измерений при проектировании и эксплуатации железных дорог. Суть мобильных спутниковых измерений заключается в объезде трассы железнодорожным подвижным средством с прицепленными вагонами-платформами или двоосевыми тележкам, на которых замонтированы приемники GNSS. Описана принятая исследовательская методология а также ход произведенных измерений на железнодорожном и трамвайном пути. Принят к изучению вопрос относительно точности спутниковых измерений. Пришли к выводу, что оптимальным решением – гарантирующим максимальную точность в определении координат GNSS во время исследований инвентаризационных железнодорожных путей – является двухсистемная спутниковая геодезическая сеть GPS / GLONASS. Определение координат существующего пути в государственной системе пространственных соответствий 2000 ведет к необходимости изменения существующей до настоящего времени методики проектирования. В труде представлены принципы нового метода проектирования геометрических систем пути, приспособленного к технике спутниковых измерений, в которой решение проблемы проектирования заключается на определении универсальных уравнений, описывающих целую геометрическую систему. Знание координат позволяет также на определение геометрической формы существующего пути. Описаны модули разработанной компьютерной программы SATTRACK с целью ее визуализации, оценки и проектирования железнодорожной линии, относящиеся к визуализации прохождения железнодорожного пути, оценки прямых участков пути, создание полигона главных направлений, оценки участков пути находящихся на кривых а также определение формы оси эксплуатируемого железнодорожного пути. Поднято также вопрос оценки эффектов регулирования оси пути. Проведенные мероприятия относительно измерений показали низкую результативность применяемой в настоящее время методики регулирования и подчеркнули необходимость проведения радикальных изменений в этой сфере.

**Ключевые слова:** спутниковые измерения, оценка точности, геометрическая система пути, методика проектирования, восстановление формы и регулирование оси пути

