

PROJEKTOWANIE TRAS TRAMWAJOWYCH PRZY WYKORZYSTANIU MOBILNYCH POMIARÓW SATELITARNYCH¹

Jacek SZMAGLIŃSKI

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

W pracy przedstawiono metodykę projektowania tras tramwajowych dostosowaną do rozwijanej w Zespole Naukowym metody Mobilnych Pomiarów Satelitarnych. Opisano badania inwentaryzacyjne wykonane na torach tramwajowych, których wyniki posłużyły jako dane wejściowe w procesie projektowania. Pokazano, w jaki sposób dostosowano analityczne algorytmy projektowania tras kolejowych do specyfiki układów geometrycznych występujących w torach tramwajowych. Opisano proces projektowania z wykorzystaniem omówionych algorytmów i przedstawiono przykłady ich zastosowania w przebudowie lub rozbudowie istniejących tras tramwajowych. Podczas tworzenia przykładowych wariantów modernizacji zinventaryzowanych odcinków wykorzystano propozycję wytycznych projektowych dostosowanych do eksploatacji współczesnych niskopodłogowych tramwajów.

Słowa kluczowe: pomiary GNSS, projektowanie tras, układy geometryczne torów tramwajowych.

1. WSTĘP

W Polsce już od lat sześćdziesiątych XX wieku zastanawiano się, jak skutecznie przyspieszyć i uatrakcyjnić transport tramwajowy. Przenoszono linie zlokalizowane w centrach miast na trasy omijające wąskie uliczki, co pozwoliło na zwiększenie prędkości komunikacyjnych. Na przełomie lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych wprowadzono do powszechnej eksploatacji pierwsze tramwaje szybkobieżne (typu 105N i 805N), co spowodowało skokowe zwiększenie maksymalnych prędkości osiąganych na odcinkach międzyprzystankowych. Na przełomie XX i XXI wieku zaczęto wprowadzać do eksploatacji nowoczesne tramwaje niskopodłogowe. Są one znacznie cięższe, dłuższe i charakteryzują się znacznie większą mocą niż tramwaje generacji 105N/805N. Okazało się, że różnice konstrukcyjne pomiędzy generacjami tramwajów stają się źródłem licznych problemów eksploatacyjnych. Niewątpliwym wzrost komfortu spowodowany ułatwieniem wsiadania bez stopni w drzwiach stanowi przyczynę konieczności zastosowania w wielu konstrukcjach wózków sztywnych lub o niewielkiej możliwości skrętu,

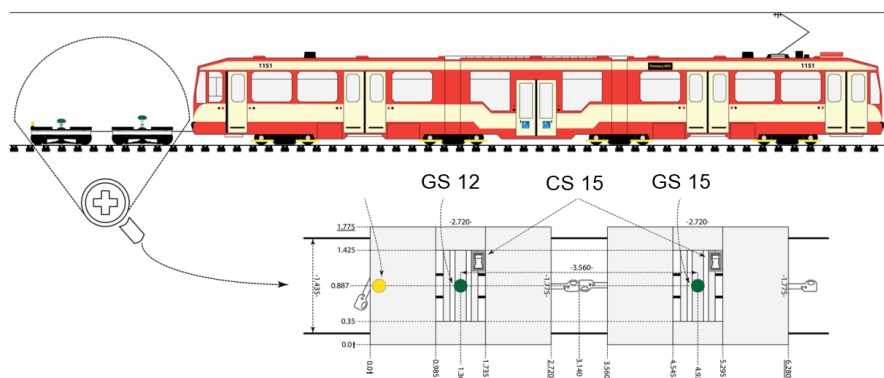
¹ DOI 10.21008/j.1897-4007.2017.25.30

które powodują znacznie intensywniejsze szarpnięcia podczas pokonywania łuków. Źródłem takiego stanu rzeczy są metody projektowania torów tramwajowych, które dostosowują geometrię toru do eksploatacji szybkobieżnych pojazdów opartych na wózkach obrotowych lub wolnobieżnych opartych na wózkach sztywnych. Tymczasem współczesne tramwaje, z uwagi na prędkość, zbliżone są do pojazdów szybkobieżnych, a z uwagi na konstrukcję oparcia pudła na wózku - do wolnobieżnych. W niniejszej pracy opisano metodykę inwentaryzacji układu geometrycznego, a następnie jego oceny pod względem współpracy z taborem najnowszej generacji.

2. MOBILNE POMIARY SATELITARNE

Rozwijające się obecnie metody wyznaczania współrzędnych, przy wykorzystaniu metod satelitarnych, pozwalają na wykonanie dokładnej inwentaryzacji odcinka toru kolejowego lub tramwajowego w sposób efektywny z praktycznego i ekonomicznego punktu widzenia. Pierwsze prace dotyczące pomiarów satelitarnych na torach kolejowych, przy użyciu poruszającego się wózka pomiarowego, wykonano w latach dziewięćdziesiątych na Uniwersytecie w Grazu przy współpracy z firmą Plasser Theurer [16]. Następnie na początku XXI wieku, na uniwersytecie Marshalla, prowadzone były badania nad wykorzystaniem precyzyjnych pomiarów GNSS do badania usterek toru [34]. Pozycjonowanie satelitarne spełniało w systemie pomiarowym rolę pomocniczą, umożliwiającą szybkie przypisanie współrzędnych do określonej usterki.

Od 2009 roku Interdyscyplinarny Zespół Naukowy składający się z pracowników Politechniki Gdańskiej, Akademii Morskiej i Akademii Marynarki Wojennej prowadzi badania nad wykorzystaniem ciągłych, mobilnych pomiarów GNSS do określania współrzędnych osi toru [13, 14, 25]. W 2012 roku rozpoczęto badania nad możliwością zastosowania metody Mobilnych Pomiarów Satelitarnych przy pomiarach inwentaryzacyjnych oraz pracach projektowych wykonywanych na torach tramwajowych. W ramach tych prac wykonano cztery kampanie pomiarowe, przeprowadzone w 2012, 2013, 2015 i 2016 roku. Metoda Mobilnych Pomiarów Satelitarnych [15], opracowana została w celu odtworzenia geometrycznego kształtu toru przy użyciu poruszającego się pojazdu kolejowego. W metodzie tej odpowiednie dobranie częstotliwości rejestracji współrzędnych do prędkości jazdy umożliwia dokonanie zapisu współrzędnych osi toru przy odległościach pomiędzy punktami pomiarowymi nie przekraczających 0,3 m. Obecnie wykorzystywane odbiorniki pozwalają na zapis z częstotliwością 20 pomiarów na sekundę, co pozwala na efektywny pomiar z prędkością około 20 km/h. Podczas wykonanych pomiarów jako pojazd silnikowy wykorzystano tramwaj N8C-MF01. Wagony pomiarowe, wykonane z wózków przedwojennego tramwaju serii DWF 300, uznano za najlepiej spełniające przyjęte kryteria dotyczące możliwości odtworzenia kształtu toru [28]. Zestaw pomiarowy, wykorzystywany podczas badań, pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Zestaw pomiarowy wykorzystywany podczas pomiarów inwentaryzacyjnych na liniach tramwajowych

Podczas badań, odbiorniki rejestrowały sygnał, z którego można odczytać między innymi:

- datę i godzinę wykonania pomiaru,
- współrzędne geodezyjne punktu pomiarowego (lub współrzędne płaskie w układzie PL-2000),
- promień niepewności określenia pozycji w 2D i 3D,
- liczbę widocznych satelitów na horyzoncie,
- geometrię systemu kosmicznego,
- metodę określenia współrzędnych (kodowa, fazowa).

W celu odrzucenia pozycji obciążonych dużym błędem, do dalszych analiz wybrano jedynie współrzędne wyznaczone metodą fazową [24]. Następnie stworzono plik tekstowy, zawierający dla każdego punktu pomiarowego informacje o współrzędnych N, E, wysokości elipsoidalnej, dokładności wyznaczenia pozycji 2D i 3D oraz czasie wykonania pomiaru. Tak określone dane posłużyły następnie do odtworzenia trasy tramwajowej, przy wykorzystaniu rozwijanego przez Zespół Naukowy programu SATTRACK [12], działającego w środowisku Scilab [29].

3. DOSTOSOWANIE ALGORYTMÓW PROGRAMU SATTRACK DO SPECYFIKI LINII TRAMWAJOWYCH

W Katedrze Transportu Szynowego i Mostów Politechniki Gdańskiej opracowano program SATTRACK służący do analiz torów pomierzonych metodą MPS oraz projektowania nowych układów geometrycznych. Napisana w języku skryptowym aplikacja składa się z modułów, które umożliwiają autonomiczną pracę. Podstawowe moduły umożliwiają:

- wizualizację pomierzonej trasy,
- ocenę odcinków prostych,

- stworzenie układu poligonowego,
- ocenę łuków,
- projektowanie nowych układów geometrycznych.

Moduły umożliwiają odtworzenie podstawowych parametrów pomierzonej linii kolejowej, takich jak długości oraz azymuty odcinków prostych, kąty zwrotu trasy, promienie łuków oraz długości krzywych przejściowych. Zinventaryzowane wartości stanowią podstawę do analizy możliwości dostosowania istniejącej geometrii trasy do aktualnych potrzeb. Przy projektowaniu stosowane są analityczne algorytmy obliczeniowe, opracowane przez profesora Władysława Koca [11].

Tramwaje różnią się jednak znacząco od pociągów. Trudno odnaleźć fragmenty trasy tramwajowej (oprócz specjalnie wydzielonych tras tramwaju szybkiego), po których pojazdy poruszają się ze stałą prędkością, gdyż typowe linie tramwajowe charakteryzują się znacznie mniejszymi długościami elementów geometrycznych w porównaniu z liniami kolejowymi. Na torach tramwajowych występują zupełnie inne postacie geometryczne krzywych przejściowych (krzywe przejściowe złożone z łuków koszowych lub rampy przechyłkowe niezwiązane z długością krzywych przejściowych). Na liniach tramwajowych występują bardzo duże kąty zwrotu trasy (przekraczające często 90°) oraz duże pochylenia (przekraczające nawet 50‰). Również z uwagi na prowadzenie pomiarów w terenie zurbanizowanym uzyskano znacząco większą niepewność pomiarową niż w przypadku terenu otwartego [28]. Wymienione różnice spowodowały występowanie problemów przy próbie bezpośredniego wykorzystania zaimplementowanych w SATTRACKu algorytmów do analiz torów tramwajowych. Po przeprowadzeniu pierwszej kampanii pomiarowej w 2012 roku rozpoczęto prace nad ich dostosowaniem do metod projektowych występujących na torach tramwajowych. Zaproponowano modyfikację następujących elementów składowych kodu programu SATTRACK:

- poszerzono zakres analizowanych danych,
- wprowadzono możliwość ciągłego pomiaru przechyłki i wprowadzania korekcy przesunięć środka anteny,
- ulepszo metodę odtwarzania kierunków głównych, uwzględniającą niepewność pomiarową pomierzonych punktów,
- wprowadzono narzędzia służące do oceny trasy w profilu podłużnym [26, 27],
- wprowadzono modyfikacje modułu projektowego, uwzględniające różnice pomiędzy metodami kształtowania tras kolejowych i tramwajowych,
- zmieniono metodę określania odchyłeń pomiędzy pomierzonym a projektowanym kształtem toru,
- wprowadzono metodę obliczania przejazdu teoretycznego dla zinventaryzowanych lub projektowanych odcinków międzyprzystankowych [30, 31].

4. PROPOZYCJA PARAMETRÓW PROJEKTOWYCH

W czasie prac nad modyfikacją zaimplementowanych w programie SATTRACK algorytmów projektowych pojawił się dylemat: czy należy bezkrytycznie skopiować rozwiązania projektowe stosowane obecnie w Polsce [8], które wywodzą się bezpośrednio z bardzo starych Wytycznych Technicznych [17], czy też od początku starać się zaimplementować rozwiązania bazujące na zasadach dynamiki ruchu pociągów? Proponowane w Wytycznych rozwiązania są uproszczone, wartości projektowe przedstawiono w formie tabel, brakuje określenia parametrów dopuszczalnych, jak również proponuje się kształtowanie układu geometrycznego bez analizy korelacji pomiędzy wartościami geometrycznymi a kinematycznymi. Praktyka eksploatacyjna w Polsce pokazuje, że wiele nowoprojektowanych tras tramwajowych nie zapewnia oczekiwanego komfortu oraz czasu przejazdu, pomimo obsługi najnowszymi niskopodłogowymi tramwajami. Stanowi to przesłankę do postawienia tezy, że obowiązujące obecnie Wytyczne nie są dostosowane do eksploatacji współczesnych niskopodłogowych tramwajów i powinny zostać zmodyfikowane oraz dostosowane do obecnych wymogów.

Aby określić niezbędny zakres modyfikacji Wytycznych, przeprowadzono ich analizę porównawczą z kilkunastoma dokumentami opisującymi projektowanie torów tramwajowych na świecie. Przetłumaczono, a następnie porównano wytyczne amerykańskie [1, 18, 35], australijskie [37], brytyjskie [9], francuskie [2, 10], kanadyjskie [4], niemieckie [21, 36] oraz szwajcarskie [5, 6]. Najważniejsze różnice w podejściu do projektowania pomiędzy Wytycznymi Technicznymi a przeanalizowanymi dokumentami zagranicznymi dotyczą następujących obszarów:

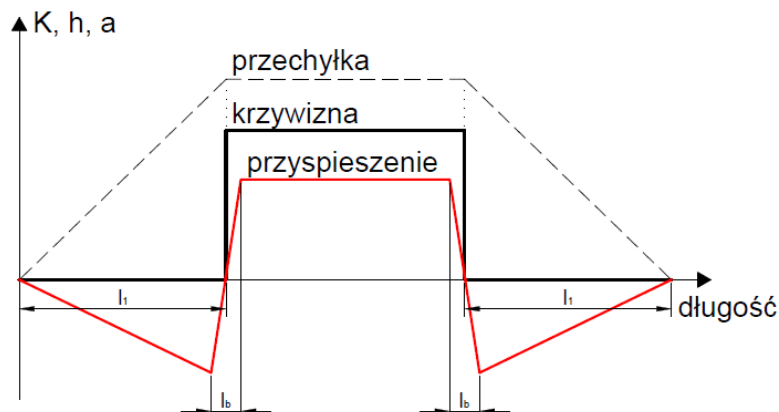
- w zagranicznych wytycznych określono wartości dopuszczalne parametrów kinematycznych, które oblicza się analogicznie jak w przypadku polskich i europejskich dokumentów kolejowych [3, 7, 22, 23]. W zależności od dokumentu analizowane są parametry przyspieszenia niezerównoważonego w płaszczyźnie poziomej i pionowej, przyrostu przyspieszenia na połączeniu prostej z łukiem, prędkości przyrostu przechyłki na rampie przechyłkowej oraz stromości rampy przechyłkowej,
- w zagranicznych wytycznych inaczej kształtuje się krzywe przejściowe; najczęściej zalecaną formą jest klotoida. Stosowanie łuków przejściowych (zalecanych w Wytycznych Technicznych) jest ściśle ograniczone do układów szczególnie trudnych na liniach istniejących bądź całkowicie zakazane. Zaleca się, aby długości ramp przechyłkowych odpowiadały długościom krzywych przejściowych,
- w zagranicznych wytycznych dopuszcza się znacznie większe pochylenia podłużne toru (dochodzące nawet do 10% przy założeniu, że eksploatowany na linii tabor posiada odpowiednie właściwości trakcyjne),
- zaleca się stosować większe promienie łuków na szlaku, z uwagi na duże prędkości osiągnięte przez tramwaje na odcinkach międzyprzystankowych.

Poza analizami dokumentów przeprowadzono również serię badań dotyczących rzeczywistych prędkości osiąganych przez tramwaje na układach geometrycznych oraz rzeczywistych wartości przyspieszeń niezrównoważonych i ich przyrostów w konkretnych modelach tramwajów podczas takich przejazdów. Współczesne tramwaje niskopodłogowe, dysponujące znacznie większą mocą niż pojazdy klasyczne, w analogicznych punktach trasy poruszają się z większą prędkością. Jednocześnie różnice konstrukcyjne dotyczące sposobu oparcia pudła wagonu na wózkach powodują, że w analogicznych warunkach ruchowych pasażerowie odczuwają nawet dwukrotnie większe przyrosty przyspieszeń niezrównoważonych.

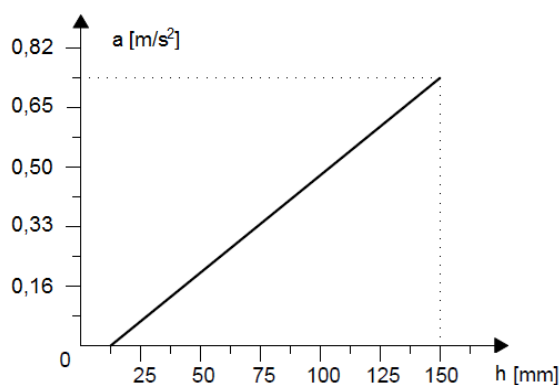
Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz stworzono metodykę obliczania przejazdu teoretycznego dla zinwentaryzowanego toru [30, 31]. Proponuje się obliczanie wartości rzeczywistych parametrów kinematycznych, a następnie porównanie ich z wartościami dopuszczalnymi. W przypadku występowania łuków bez krzywych przejściowych lub z łukami przejściowymi wykorzystuje się metodę bazy sztywnej, w której oblicza się przyrosty parametrów na odległości pomiędzy czopami skrzywienia wózków. Dla tramwajów niskopodłogowych określono najbardziej niekorzystną długość bazy na 4 m (dla pojazdów o konstrukcji wzorowanej na tramwaju Siemens Combino [32, 33]). Z uwagi na to, że w tramwajach występuje znaczący udział przejazdów w pozycji stojącej przyjęto, że dopuszczalne wartości parametrów kinematycznych będą zmniejszone w stosunku do tych występujących w przepisach kolejowych. Poniżej podano propozycję pożądanego wartości parametrów kinematycznych wykorzystywanych w obliczeniach:

- maksymalna wartość przyspieszenia niezrównoważonego na łuku: $0,6 - 0,8 \text{ m/s}^2$,
- maksymalna wartość przyrostu przyspieszenia niezrównoważonego: $0,3 - 0,5 \text{ m/s}^3$,
- maksymalne pochylenie rampy przechyłkowej: $2 - 2,5 \text{ mm/m}$,
- maksymalna prędkość przyrostu przechyłki: $30 - 40 \text{ mm/s}$.

Zaleca się, aby w przypadku łuków, na których długości znajdują się przejazdy lub przystanki, oraz na łukach bez krzywych przejściowych lub z łukami przejściowymi nie stosować przechyłki. Dla większości przypadków już przy niewielkiej prędkości (rzędu 30 km/h) decydującym o prędkości parametrem kinematycznym będzie przyrost przyspieszenia niezrównoważonego na połączeniu prostej z łukiem, gdyż zastosowana przechyłka z rampą przechyłkową na prostej przed łukiem nie zmniejsza tego przyrostu (rys. 2). W przypadku łuków z krzywymi przejściowymi zaleca się stosowanie przechyłki z rampą o długości krzywej przejściowej. Wartość przechyłki powinna być tak obliczona, aby nie została przekroczona wartość dopuszczalnego przyspieszenia niezrównoważonego oraz nie wystąpił nadmiar przechyłki. Wartość przechyłki można dobrać według zasad opisanych w przepisach amerykańskich [35], w których zaleca się, żeby stosunek przyspieszenia niezrównoważonego oraz przechyłki na łuku były zbliżone do przebiegu prostej pokazanej na rysunku 3. Przesunięcie wykresu w prawo wynika z możliwości stosowania przechyłki na odcinkach prostych na torze zabudowanym z uwagi na spływ wody.



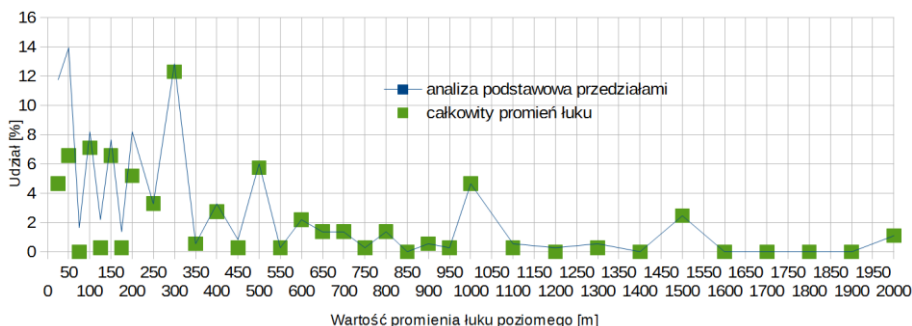
Rys. 2. Wykres zmienności przyspieszenia nie zrównoważonego na tle wykresu zmienności krzywizny i przechyłki dla łuku bez krzywych przejściowych (na podstawie [20])



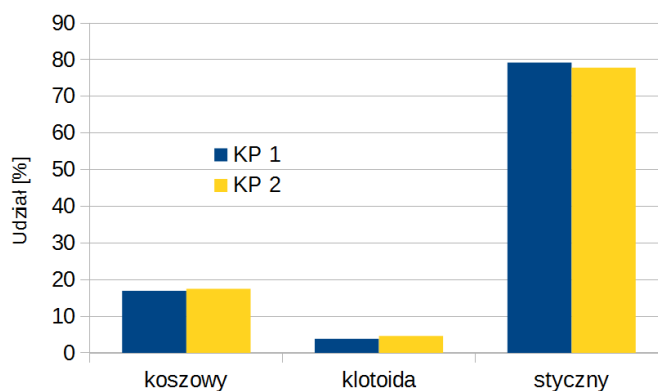
Rys. 3. Zalecana zależność pomiędzy przyspieszeniem nie zrównoważonym a przechyłką (na podstawie [35])

5. ANALIZA PRZYKŁADOWEGO UKŁADU GEOMETRYCZNEGO

Na podstawie przeprowadzonych w latach 2012-2016 badań inwentaryzacyjnych przeanalizowano szereg odcinków tras tramwajowych w Gdańsku. W sumie zbadano 379 łuków oraz 399 odcinków prostych. Inwentaryzacja stanu istniejącego potwierdziła tezę, że projekty torów tramwajowych w Polsce wykonywane są według schematów zapisanych w Wytycznych Technicznych, bez prób przeprowadzenia optymalizacji uwzględniającej położenie łuku na szlaku czy dostępności terenu. Wyraźnie widoczna jest nadreprezentacja typowych promieni łuków występujących w tabelach doboru przechyłki [17] (50, 100, 150, 200, 300, 500, 1000 m) – rysunek 4 oraz stycznych połączeń łuków z prostymi – rysunek 5.



Rys. 4. Udział procentowy zinwentaryzowanych wartości promieni łuków tramwajowych w Gdańsku



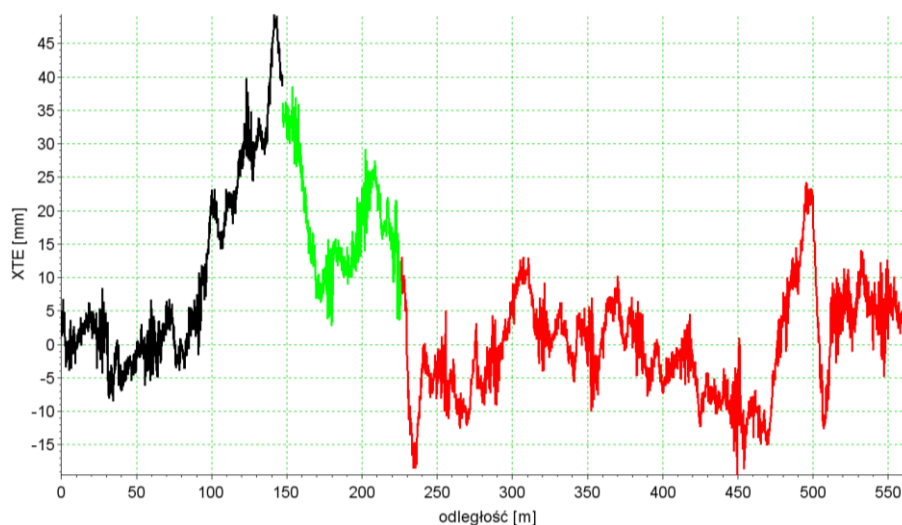
Rys. 5. Udział procentowy zinwentaryzowanych postaci krzywych przejściowych w Gdańsku

W celu wizualizacji możliwości, jakie daje zmodyfikowany program SATTRACK, poniżej pokazano pełną analizę jednego ze zinwentaryzowanych odcinków. Wybrano szlak pomiędzy przystankami Przemyska i Płocka, zlokalizowany na linii tramwajowej Chełm Witosa – Łostowice Świętokrzyska, który został pomierzony wielokrotnie przy użyciu następujących metod:

- odtworzenie przebiegu osi toru w 3D metodą Mobilnych Pomiarów Satelitarnych,
- pomiar przechyłki przy użyciu toromierza ręcznego,
- pomiar przechyłki i przyspieszeń przy użyciu akcelerometrów MEMS.

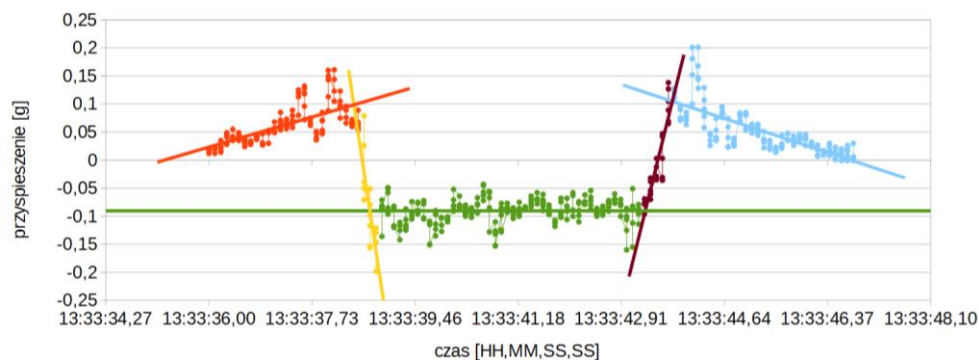
Odległość pomiędzy przystankami wynosi 568 m, zinwentaryzowany układ geometryczny w płaszczyźnie poziomej składa się z prostej o długości 147,0 m i azymucie $179,07^\circ$, łuku o promieniu 150 m o długości 80,5 m oraz prostej o długości 340,5 m i azymucie $148,29^\circ$. Kąt zwrotu trasy wynosi $30,78^\circ$. Współrzędne wierzchołka układu poligonowego, określone w układzie PL-2000 wynoszą

$N=6022486,384$ m, $E=6538794,822$ m. Na łuku występuje przechyłka o wartości 127 mm, rampy przechyłkowe zostały zlokalizowane na prostych przed łukiem. Stan geometrii toru w czasie badań był bardzo dobry, co potwierdza wykres różnic XTE (ang. cross track error [25]) pomiędzy zinwentaryzowanym kształtem toru a geometrią projektową (po wprowadzeniu poprawki związanej z przechyłką), który pokazano na rysunku 6.



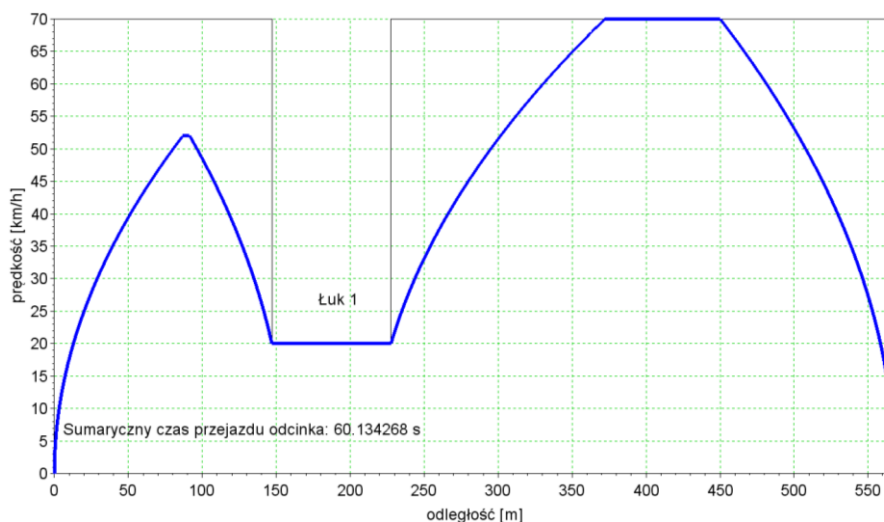
Rys. 6. Wykres różnic pomiędzy projektowanym a istniejącym kształtem toru. Kolorem czarnym i czerwonym pokazano odcinki proste, kolorem zielonym część kołową łuku

Wykonano następnie serię pomiarów przyspieszeń występujących podczas przejazdu odcinka międzyprzystankowego. Pomiar wykonano w tramwajach typu N8C oraz 120NaG poruszających się z różnymi prędkościami. Najbardziej niekorzystne warunki zarejestrowano podczas przejazdu z prędkością 60 km/h pojazdem 120NaG (największa dopuszczalna w tym miejscu prędkość). Zarejestrowano wtedy średnie wartości przyspieszenia niezrównoważonego na łuku dochodzące do 1 m/s^2 oraz przyrosty przyspieszenia o średniej wartości przekraczającej 7 m/s^3 w miejscu stycznego połączenia prostej z łukiem. Wykres przyspieszeń zarejestrowanych podczas tego przejazdu pokazano na rysunku 7. W przypadku tramwaju N8C poruszającego się z tą samą prędkością przyrosty przyspieszeń nie przekraczały 4 m/s^3 . Wykonane obliczenia pozwoliły na oszacowanie długości baz sztywnych dla tramwaju N8C na około 6 m (zgodnie z teoretycznym), a dla 120NaG w najmniej korzystnej pozycji (w członie opartym na wózku) na około 4 m.



Rys. 7. Wykres zależności przyspieszenia od czasu zarejestrowany podczas przejazdu przez analizowany łuk. Kolorem czerwonym i niebieskim oznaczono przyrosty przyspieszenia na rampach przechyłkowych, żółtym i fioletowym na połączeniu łuku z prostą a kolorem zielonym na części kołowej łuku

Wyraźnie widać, że w czasie przejazdu z dużą prędkością zostały przekroczone zalecane wartości przyspieszenia (o 25%) i jego przyrostu w czasie (o 1400% !). Zachowanie pełnego komfortu podróży wymaga zmniejszenia prędkości z zakładanej w projekcie wartości 60 km/h do 20 km/h. Spowodowałyby to wydłużenie czasu przejazdu pomiędzy przystankami z zakładanej 46 s do ponad 60 s oraz zwiększyłyby znacząco wydatek energetyczny związany z koniecznością hamowania przed łukiem i rozpędzania za nim. Obliczenia trakcyjne wykonano metodą obliczeń uproszczonych [19], która zgodnie z przeprowadzonymi badaniami pozwala na uzyskanie bardzo dobrych rezultatów przy modelowaniu poruszania się tramwajów [30]. Wykres prędkości pokazano na rysunku 8.



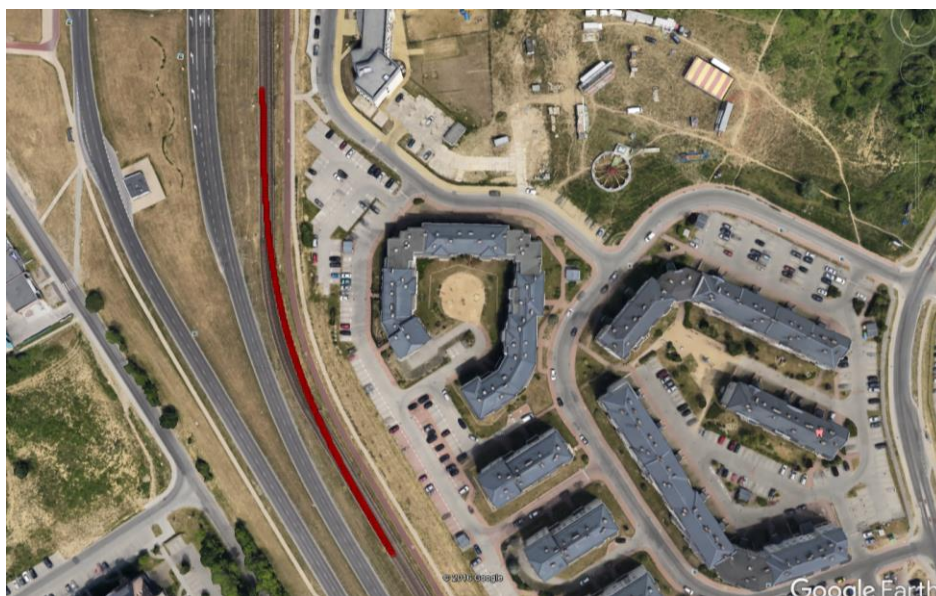
Rys. 8. Wykres prędkości w zależności od odległości na odcinku pomiędzy przystankami

Następnie wykonano analizę dotyczącą zmniejszenia czasu przejazdu i likwidacji ograniczeń prędkości wynikających z istniejącego układu geometrycznego. Stwierdzono, że:

- na łuku występuje zbyt duża przechyłka w stosunku do możliwej do osiągnięcia komfortowej prędkości. Przechyłka o wartości 127 mm była również powodem problemów ze statecznością toru z uwagi na odsłanianie się czół podkładów,
- brakuje krzywych przejściowych na połączeniu prostej z łukiem,
- zastosowany promień łuku nie umożliwia osiągnięcia pełnej prędkości projektowej (70 km/h) nawet dla maksymalnej przechyłki 150 mm.

W pierwszym podejściu zaproponowano zwiększenie promienia łuku do wartości 250 m, zmniejszenia przechyłki i wykonaniu krzywych przejściowych o długości 70 m. Pozwoliło to na osiągnięcie pełnej prędkości projektowej o wartości 70 km/h na długości łuku. Jednak konieczne przesunięcia osi toru w środku łuku wyniosły ponad 4 m. W prezentowanym przypadku jest to wartość przesunięcia, którą można wykonać z uwagi na dużą rezerwę terenu wzdłuż linii tramwajowej (rys. 9).

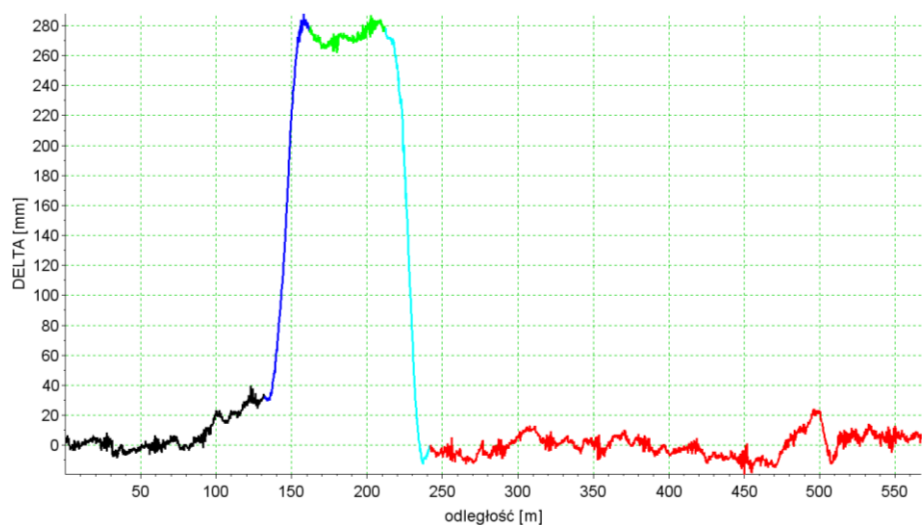
Jednak typowo na terenie zurbanizowanym, z uwagi na kolizje z istniejącymi sieciami, tak duża modyfikacja przebiegu linii tramwajowej jest zwykle niewykonalna lub bardzo kosztowna.



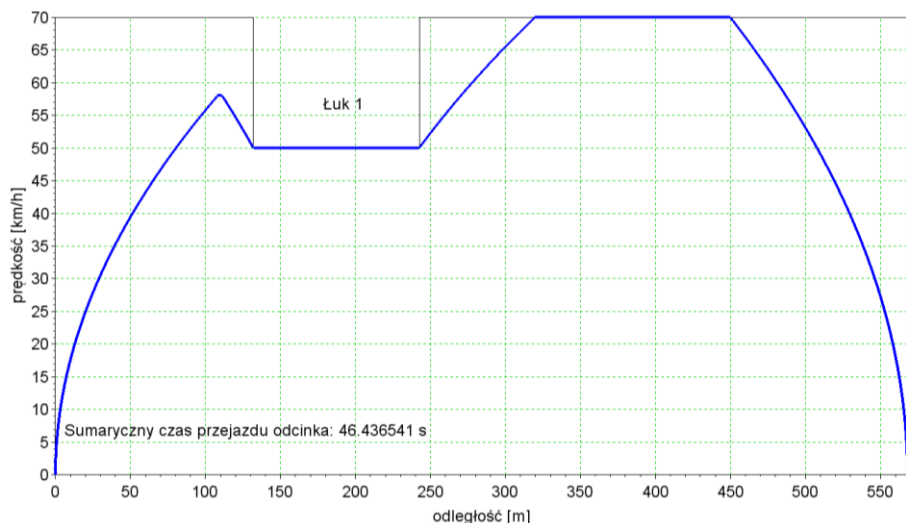
Rys. 9. Przebieg linii tramwajowej umożliwiający przejazd z prędkością 70 km/h, na tle istniejącej trasy. Opracowanie własne na tle ortofotomapy Google Earth

W celu zminimalizowania niezbędnych przesunięć, zdecydowano na zmniejszenie prędkości projektowej na długości łuku do 50 km/h. Dla takiej prędkości dobrano

przechylkę o wartości 85 mm i symetryczne krzywe przejściowe w postaci kłotoidy o długościach 30 m. Niezbędne przesunięcia osi toru dla tak dobranego układu geometrycznego nie przekraczają 300 mm (rys. 10), jednocześnie zmniejszony został teoretyczny czas przejazdu do wartości 46,4 s (rys. 11), co pozwoliło na uzyskanie prędkości komunikacyjnej na poziomie 33,4 km/h (przy założeniu postoju na przystanku o długości 15 s).



Rys.10. Wykres przesunięć osi toru dla projektowanego układu z krzywymi przejściowymi



Rys. 11. Wykres prędkości w zależności od odległości na odcinku pomiędzy przystankami dla zmodyfikowanego układu geometrycznego

LITERATURA

- [1] American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association: Manual for Railway Engineering, Lanham MD 2016.
- [2] Cetrú: Matérialisation du Gabarit Limite d'Obstacle des transports guidés urbains, Lyon 2006.
- [3] Commission Regulation (EU) No 1299/2014 of 18 November 2014 on the Technical Specifications for Interoperability relating to the 'infrastructure' subsystem of the rail system in the European Union.
- [4] Consortium Genivar Systra: Tramway de Montréal, Phase 1 Analyse du réseau initial de tramways, Volume C2 - Hypothèses de conception, 2009.
- [5] Das Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation: Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung, 2014l.
- [6] Der Schweizerische Bundesrat: Verordnung über Bau und Betrieb der Eisenbahnen (Eisenbahnverordnung, EBV), 1983.
- [7] Dz. U. 1998 nr 151 poz. 987: Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 10 września 1998 roku w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie.
- [8] Dz. U. 1999 nr 43 poz. 430, Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie.
- [9] Edinburgh Tram Project: Design manual, appendix 1: Tram Design manual, 2005.
- [10] Ingérop Conseil & Ingénerie, Maîtrise d'oeuvre du prolongement de la ligne de tramway F-2eme phase, Sztrasburg 2010.
- [11] Koc W.: Metoda projektowania rejonu zmiany kierunku trasy kolejowej, Problemy Kolejnictwa 152/2011.
- [12] Koc W., Chrostowski P.: Ocena trasy kolejowej położonej w łuku na podstawie pomiarów satelitarnych. Przegląd Komunikacyjny 2013, nr 4.
- [13] Koc W., Specht C., Chrostowski P., Palikowska K.: Ocena dokładności określania osi toru kolejowego na drodze pomiarów satelitarnych, Logistyka 6/2010.
- [14] Koc W., Specht C., Chrostowski P., Szmagliński J.: Możliwości satelitarnej oceny położenia geometrycznego tramwajowych węzłów rozjazdowych. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie, seria: Materiały Konferencyjne, nr 2 (zeszyt 101), Kraków 2013.
- [15] 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, 2009.
- [16] Lichtberger, B., 'State of Chord Measurement Using EM-SAT or GPS', El/Der Eisenbahningenieur, 46, 8, pp 560-ff, 1995,
- [17] MAGTiOS: Wytyczne techniczne projektowania budowy i utrzymania torów tramwajowych, Warszawa 1983.
- [18] Massachusetts Bay Transportation Authority: Guide Specification for Structural Design of Rapid Transit and Light Rail Structures, 2005.
- [19] Nowosielski L.: Organizacja przewozów kolejowych, KOW Warszawa 1999.

- [20] Oleksiewicz W., Kraśkiewicz C.: Rozwój konstrukcji i układu geometrycznego torowisk tramwajowych, jako istotny element postępu w miejskim transporcie szynowym, Zeszyty Naukowo – Techniczne SITK RP oddział w Krakowie, 3/2013.
- [21] Ostaszewicz J., Rataj M.: Szybka komunikacja miejska. WKŁ, Warszawa 1979.
- [22] PN-EN 13803-1: 2010: Kolejnictwo - Tor - Parametry projektowania toru w planie - Tor o szerokości 1435 mm i większej - Część 1: Szlak.
- [23] PN-EN 13803-2: 2010: Kolejnictwo - Tor - Parametry projektowania toru w planie - Tor o szerokości 1435 mm i większej - Część 2: Rozjazdy, skrzyżowania i inne porównywalne przypadki z nagłymi zmianami krzywizny.
- [24] Specht C.: System GPS, Wydawnictwo Bernardinum, Pelplin 2007.
- [25] 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.
- [26] Specht C., Koc W., Chrostowski P., Szmagliński J.: Satellite inventory of tram track geometrical layout. [CD-ROM] Conference Papers of 13th International Conference & Exhibition RAILWAY ENGINEERING 2015, Edinburgh, Scotland, 2015, Metros & Tramways Section.
- [27] Specht, C., Koc, W., Chrostowski, P., Szmagliński, J., Skóra, M., Specht, M.: Zastosowanie mobilnych pomiarów satelitarnych do określania położenia wysokościowego torów. Przegląd Komunikacyjny 70/2015.
- [28] Specht C., Koc W., Nowak A., Szulwic J., Szmagliński J., Skóra M., Specht M., Czarnik M.: Dostępność fazowych rozwiązań GPS/GLONASS podczas geodezyjnej inwentaryzacji dróg szynowych - na przykładzie linii tramwajowej Gdańska, Technika Transportu Szynowego 9/2012.
- [29] Strona Internetowa Scilab Enterprises S.A.S: www.scilab.org (dostęp 03.02.2017).
- [30] Szmagliński J.: Analiza odcinków generujących straty czasu w transporcie tramwajowym, Przegląd Komunikacyjny 6/2015.
- [31] Szmagliński J.: Metoda określania maksymalnej prędkości jazdy na łukach, dostosowana do specyfiki tras tramwajowych, Problemy Kolejnictwa 167/2015.
- [32] Szmagliński J.: Tramwaje niskopodłogowe. Geneza, konstrukcje, Infrastruktura Transportu 4/2014.
- [33] Szmagliński J.: Tramwaje niskopodłogowe w Polsce, Infrastruktura Transportu 6/2014.
- [34] Szwilski T. B.: Determining rail track movement trajectories and alignment using HADGPS, AREMA Conference, Chicago 2003.
- [35] Transit Cooperative Research Program: Track Design Handbook for Light Rail Transit, Washington D.C. 2012.
- [36] Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung - BOStrab), 1987.
- [37] Yarra Trams, Tram track design guidelines, Melbourne 2003.

DESIGNING OF TRAM TRACKS WITH THE USE OF THE MOBILE SATELLITE MEASUREMENTS

Summary

The paper presents the methodology of designing the tram routes adapted to the method of Mobile Satellite Measurements developed by the Scientific Team. The process of tram

tracks inventory has been described. The results of inventory were used as inputs data in the design process. The paper shows how the analytical algorithms of railroad design have been adapted to the specificity of the tram lines geometry. The design process with the use of these algorithms has been described. During the creation of exemplary variants of the modernization of the inventoried sections of tram tracks, it was used the developed design guidelines adapted to the operation of modern low-floor trams.

Keywords: GNSS measurements, design of tram lines, tram tracks geometric layout.

Dane autora:

Mgr inż. Jacek Szmagliński

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Katedra Transportu Szynowego i Mostów

e-mail: jacsmag@pg.gda.pl

telefon: +48 58 348 6090