

Wyznaczanie osi torów tramwajowych z wykorzystaniem satelitarnego wieloantenowego systemu pomiarowego

Determination of the tram track axis using a multi receiver GNSS measurement system



Andrzej Wilk

Dr hab. inż., prof. uczelni

Politechnika Gdańska,
Katedra Inżynierii Elektrycznej
Transportu

andrzej.wilk@pg.edu.pl



Cezary Specht

Prof. dr hab. inż.

Uniwersytet Morski w Gdyni,
Katedra Geodezji
i Oceanografii

c.specht@wn.umg.edu.pl



Władysław Koc

Prof. dr hab. inż.

Politechnika Gdańska, Katedra
Transportu Szynowego i
Mostów

kocwl@pg.edu.pl



Krzysztof Karwowski

Dr hab. inż., prof. uczelni

Politechnika Gdańska,
Katedra Inżynierii Elektrycznej
Transportu

krzysztof.karwowski@pg.edu.pl



Jacek Skibicki

Dr hab. inż., prof. uczelni

Politechnika Gdańska,
Katedra Inżynierii Elektrycznej
Transportu

jacek.skibicki@pg.edu.pl



Jacek Szmagliński

Dr inż.

Politechnika Gdańska, Katedra
Transportu Szynowego i
Mostów

jacek.szmaglinski@pg.edu.pl



Paweł Dąbrowski

Dr inż.

Uniwersytet Morski w Gdyni,
Katedra Geodezji
i Oceanografii

p.dabrowski@wn.umg.edu.pl



Mariusz Specht

Dr inż.

Uniwersytet Morski w Gdyni,
Katedra Transportu i Logistyki

m.specht@wn.umg.edu.pl



Marek Zienkiewicz

Dr inż.

Politechnika Gdańska, Katedra
Geodezji

marek.zienkiewicz@pg.edu.pl



Sławomir Judek

Dr inż.

Politechnika Gdańska,
Katedra Inżynierii Elektrycznej
Transportu

slawomir.judek@pg.edu.pl



Piotr Chrostowski

Dr inż.

Politechnika Gdańska, Katedra
Transportu Szynowego i
Mostów

piotr.chrostowski@pg.edu.pl



Marcin Skóra

Mgr inż.

Uniwersytet Morski w Gdyni,
Katedra Geodezji
i Oceanografii

marcin21@gmail.com



Sławomir Grulkowski

Dr inż.

Politechnika Gdańska, Katedra
Transportu Szynowego i Mostów

slawomir.grulkowski@pg.edu.pl

Streszczenie: Niniejszy artykuł nawiązuje do badań, które od 2009 roku prowadzi interdyscyplinarny zespół naukowy z Politechniki Gdańskiej i Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Badania te dotyczą problemu wyznaczenia osi toru kolejowego z wykorzystaniem techniki mobilnych pomiarów satelitarnych. Podążając za dynamicznym rozwojem technik GNSS, który można było obserwować w czasie ostatniej dekady, zespół przeprowadzał kolejne doświadczenia nakierowane na opracowanie efektywnej metody pomiarowej. Wykorzystując nabyte w tym okresie doświadczenie, przeprowadzono kolejną kampanię pomiarową na torach tramwajowych w Gdańsku. Nadrzędnym celem tych pomiarów było sprawdzenie, jak w zróżnicowanych warunkach terenowych sprawdzają się nowe założenia dotyczące sposobu mocowania anten oraz ich rozmieszczenia na platformie pomiarowej. Do tego celu wykorzystano dziesięć zestawów odbiorników GNSS oferowanych przez dwóch niezależnych producentów – obecnych liderów na rynku. Wybór poligonu testowego umożliwił analizę powtarzalności uzyskiwanych wyników z wielokrotnych pomiarów w warunkach o zróżnicowanej dostępności sygnałów GNSS. W artykule, w sposób syntetyczny zaprezentowano przebieg przeprowadzonych badań oraz otrzymane rezultaty.

Słowa kluczowe: Tor tramwajowy; Pomiar satelitarny; Analiza dokładności

Abstract: This article refers to research, that has been conducted by an interdisciplinary research team from the Gdańsk University of Technology and the Maritime University in Gdynia since 2009. These investigation concerns the determination of a railway track axis using the mobile satellite measurement technique. Following the dynamic development of GNSS techniques, that could be seen in the last decade, the team carried out further experiments aimed at developing an effective measurement method. Using the acquired experience in this period, another measurement campaign was carried out on the tram tracks in Gdańsk. The main goal of these measurements was to check how the new assumptions regarding the method of mounting the antennas as well as their placement on the measuring platform will work in various field conditions. For this purpose, ten sets of GNSS receivers offered by two independent manufacturers – currently market leaders – were used. The choice of testing track section made it possible to analyze the repeatability of results obtained from multiple measurements in conditions of varying GNSS signal availability. The article presents in a synthetic way the course of this research and the obtained results.

Keywords: Tram track; Satellite measurements; Accuracy analysis

Wstęp

Sposoby prowadzenia ruchu pociągów oraz budowy i utrzymania drogi szynowej rozwijały się w poszczególnych krajach niezależnie i trwało to przez dziesiątki lat. W rezultacie tego procesu funkcjonuje obecnie znaczna liczba niekompatybilnych między

sobą systemów zasilania pojazdów, sygnalizacji, łączności oraz wytycznych dotyczących projektowania, budowy i pomiarów diagnostycznych torów.

Aby zmienić tę niekorzystną sytuację, od pewnego czasu prowadzi się w Europie szereg prac badawczych mających na celu stworzenie wspólnej przestrzeni dla ruchu kolejowego.

W wyniku tych działań powstały dokumenty opisujące warunki Interoperacyjności infrastruktury kolejowej [22] i sterowania ruchem kolejowym [23] oraz normy dotyczące modelowania osi toru kolejowego – projektowania [20] i analizy stanu toru (tj. oceny deformacji i nierówności toru) [21].

W niniejszej pracy skupiono się na

kwestii oceny metod analizy stanu geometrycznego toru. Składa się ona z następujących faz [19]:

- planowania kampanii pomiarowej,
- pomiarów kształtu geometrycznego toru,
- analizy uzyskanych wyników,
- podejmowaniu decyzji,
- archiwizacji danych.

Obecnie wykorzystywane techniki pomiarowe służące do określania układu geometrycznego toru można podzielić, biorąc pod uwagę dwie przesłanki:

- dokładność wyznaczania parametrów (globalną i lokalną),
- wydajność metody pomiarowej (tj. prędkość pomiaru).

W ogólności można założyć, że im dana metoda pomiarowa jest bardziej czasochłonna (i kosztowna), tym spodziewać się można większej dokładności, zarówno globalnej jak również lokalnej [11]. Największą dokładnością charakteryzują się metody statyczne (tradycyjne), wykorzystujące pomiar tachymetryczny oraz pomiar strzałek na określonej cięciwie do odtworzenia lokalnych parametrów geometrycznych toru [8, 17-18, 28]. Prowadzone poszukiwania koncentrują się na opracowaniu metod pomiarowych nie ustępujących w zakresie dokładności pomiarom statycznym, przy znacząco mniejszej czasochłonności i pracochłonności. Metody takie polegają w głównym stopniu na wykorzystaniu technik GNSS (Global Navigation Satellite System) oraz integracji tych technik z innymi metodami pomiarowymi [1-2, 4-5, 9-10, 16].

W 2018 roku Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz spółka PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. przyznały konsorcjum Politechniki Gdańskiej oraz Uniwersytetu Morskiego w Gdyni projekt badawczy pt. "Opracowanie innowacyjnej metody wyznaczania precyzyjnej trajektorii pojazdu szynowego" (POIR.04.01.01-00-0017/17), który zakłada wykorzystanie i dalszy rozwój

techniki Mobilnych Pomiarów Satelitarnych. W niniejszej pracy przedstawiono zrealizowaną w ramach projektu pierwszą (pilotażową) kampanię pomiarową, mającą na celu sprawdzenie przyjętych założeń technicznych i organizacyjnych. Ze względów logistycznych kampania ta została przeprowadzona w torach tramwajowych.

Technika Mobilnych Pomiarów Satelitarnych

Po uruchomieniu w naszym kraju w 2008 roku sieci stacji referencyjnych ASG-EUPOS [3], w interdyscyplinarnym zespole naukowym Politechniki Gdańskiej i Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni zrodziła się idea wykorzystania ciągłych (mobilnych) pomiarów satelitarnych do wyznaczania osi toru kolejowego [12-13, 15]. Technika Mobilnych Pomiarów Satelitarnych, rozwijana przez wiele następnych lat, polega na wykonywaniu pomiaru przy pomocy poruszającej się platformy pomiarowej, na której są zamontowane wysokiej klasy odbiorniki GNSS wraz z kontrolerami oraz dodatkowymi instrumentami.

Platforma może posiadać własny napęd, jednak nie jest to wymagane, dlatego też podczas prowadzonych badań wykorzystywano silnikowy pojazd kolejowy lub tramwajowy. Platforma może być przez taki pojazd ciągnięta (co jest rozwiązaniem zalecanym) lub pchana.

W czasie pierwszych pomiarów, wykonanych w 2009 roku na odcinku linii kolejowej Kościerzyna – Kartuzy [12], wykorzystano zestaw pomiarowy, na który składały się z następujące elementy:

- pojazd silnikowy – drezyna EM-15,
- pojazd pomiarowy – dwuosiowy wagon PWM-15,
- instrumenty pomiarowe – 4 odbiorniki GNSS Leica ATX 1230GG.

W kolejnych latach testowano różne konfiguracje rozmieszczenia urządzeń pomiarowych, jak również modele

odbiorników GNSS coraz wyższej klasy [14, 24-27].

Wiele odcinków było mierzonych kilkakrotnie w celu sprawdzenia powtarzalności wykonywanego pomiaru. Zestawienie konfiguracji wykorzystywanych urządzeń pomiarowych pokazano na rysunku 1. Aby zwiększyć wydajność metody Mobilnych Pomiarów Satelitarnych, pomiar powinien być prowadzony z najwyższą możliwą częstotliwością wyznaczania pozycji – obecnie jest to maksymalnie 20 Hz. Analiza danych pomiarowych doprowadziła do wniosku, że powinna być stosowana taka prędkość jazdy, żeby odległość pomiędzy punktami pomiarowymi była nie większa niż 0,5 m.

Planowanie prezentowanej kampanii pomiarowej – wybór lokalizacji pomiarów i pojazdu szynowego

Planowany pomiar musiał być wykonywany w warunkach jak najbardziej zbliżonych do rzeczywistych (czyli panujących na liniach kolejowych), stąd nieodzownym było wykorzystanie odpowiedniego pojazdu szynowego. Z uwagi na skomplikowaną (i czasochłonną) procedurę uzyskania dostępu do sieci kolejowej, jak również znaczący koszt wykorzystywanych pojazdów kolejowych, zdecydowano się przeprowadzić inauguracyjną projekt kampanię pomiarową w torze tramwajowym, z wykorzystaniem pojazdu tramwajowego. Dzięki uprzejmości spółki Gdańskie Autobusy i Tramwaje, która udostępniła pojazd pomiarowy razem z obsługą, można było przystąpić do planowania kolejnych elementów kampanii pomiarowej.

Wykonując pomiar testowy należało zbadać wpływ otoczenia linii tramwajowej, stanu toru oraz jego ukształtowania geometrycznego na uzyskiwany sygnał pomiarowy. Z tego powodu należało wykorzystać fragment sieci tramwajowej składający się z możliwie jak najbardziej zróżnicowanych odcinków. Dodatkowo postano-

wiono wykonać testy powtarzalności pomiaru. Oznaczało to, żeby odcinek pomiarowy był niezbyt długi, tak aby możliwy był jego wielokrotny pomiar w ciągu jednej sesji pomiarowej. Należało też zminimalizować wszelkie prace manewrowe, które powodowałyby zwiększenie czasu badań i w konsekwencji mogły stwarzać utrudnienia przy badaniu powtarzalności pomiarów. Ostatecznie poligonem badawczym dla kinematycznych pomiarów torów tramwajowych została istniejąca droga tramwajowa w gdańskiej dzielnicy Brzeźno, która tworzy układ tak zwanej pętli ulicznej o długości około 3 km. Wykorzystanie takiego układu torów umożliwiło wykonywanie powtarzalnych pomiarów bez konieczności wykonywania manewrów na krańcówkach lub węzłach rozjazdowych. Plan sytuacyjny odcinków pomiarowych pokazano na rysunku 2. Poszczególne odcinki pomiarowe różnią się od siebie stanem nawierzchni szynowej oraz obecnością zróżnicowanych przesłon horyzontu. Pomiary zaplanowano na następujących odcinkach związanych z przebiegiem układu drogowego:

a) odcinek Alei Generała Józefa Hal-

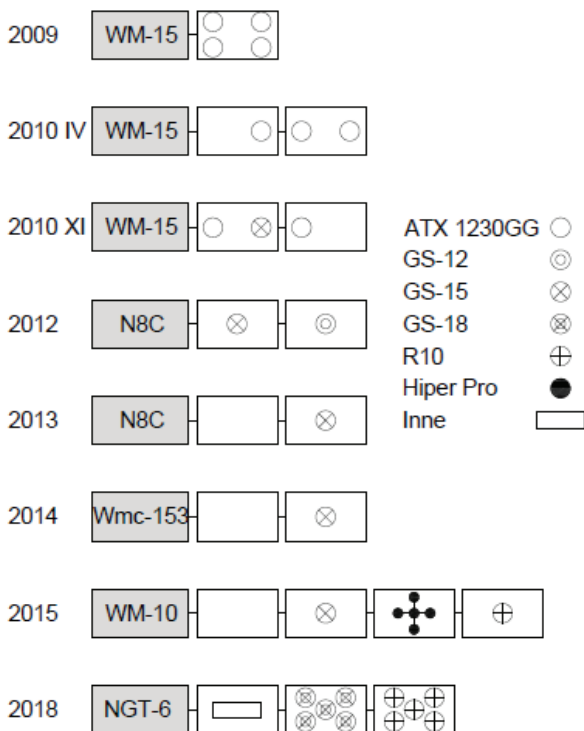
lera o długości około 850 m rozpoczynający się na krańcówce Pętla Brzeźno Plaża (zlokalizowanej w pobliżu skrzyżowania Alei Generała Józefa Hallera oraz ulicy Wczasy) i kończący na skrzyżowaniu z Aleją Macieja Płażyńskiego,

- b) odcinek Alei Macieja Płażyńskiego o długości około 400 m pomiędzy skrzyżowaniem z Aleją Generała Józefa Hallera oraz skrzyżowaniem z ulicą Gdańską,
- c) ulica Gdańska na całej długości około 1000 m od skrzyżowania z Aleją Macieja Płażyńskiego do skrzyżowania z ulicą Ignacego Krasińskiego oraz ulicą Walecznych,
- d) tor zwrotny na krańcówce Pętla Brzeźno oraz odcinek pomiędzy Pętlą Brzeźno a ulicą Mazurską (droga tramwajowa prowadzona niezależnie od układu drogowego) o długości około 150 m,
- e) ulica Mazurska na całej długości około 330 m od skrzyżowania z ulicą Południową do skrzyżowania z ulicą Dworską,
- f) odcinek niezależny od układu drogowego pomiędzy ulicą Dworską a krańcówką Pętla Brzeźno Plaża o długości około 270 m.

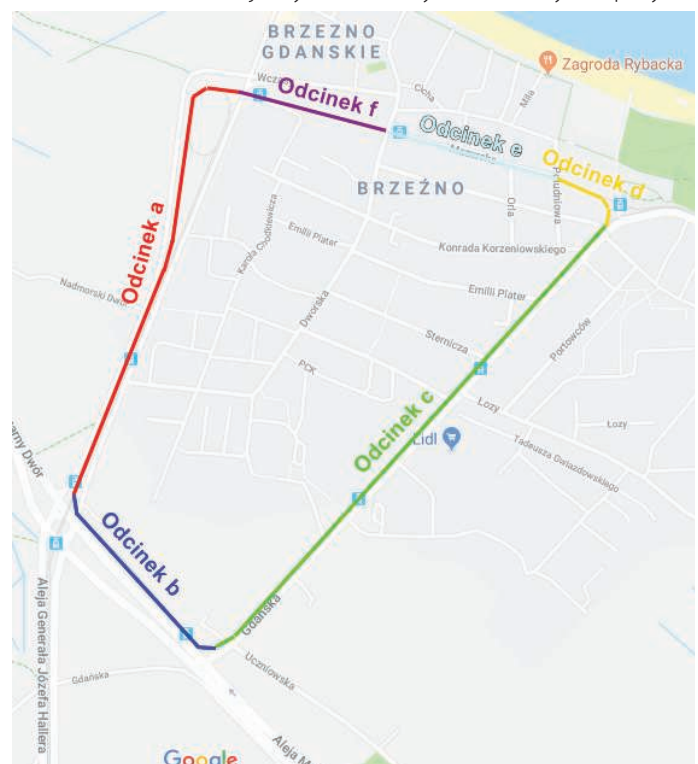
Odcinki a i b charakteryzują się niewielką liczbą przesłon terenowych (pojedyncze drzewa w pobliżu toru) oraz bardzo dobrym stanem technicznym toru. Zostały one wybrane jako referencyjne, umożliwiające analizę wpływu stanu toru oraz jego otoczenia na dokładność przeprowadzonych pomiarów. Stan nawierzchni szynowej oraz odległość od osi toru do występujących przesłód terenowych na odcinku a pokazano na rysunku 3.

Odcinek c charakteryzuje się większą niż na poprzednich odcinkach liczbą przesłon terenowych (kępy drzew oraz budynki zlokalizowane wzdłuż toru) oraz bardzo złym stanem technicznym nawierzchni (duże wartości wchrowatości oraz nierówności toru w obu płaszczyznach). Odcinek ten został wybrany jako odcinek do badania wpływu stanu toru na dokładność pomiaru. Stan nawierzchni szynowej oraz odległość od osi toru do przesłód na odcinku c pokazano na rysunku 4.

Odcinki d i e charakteryzują się bardzo dużą intensywnością przesłon terenowych (drzewa wraz z koronami zlokalizowane ponad torem tramwajowym oraz wysokie budynki przyle-



1. Schemat rozmieszczenia odbiorników GNSS i urządzeń towarzyszących w poszczególnych kampaniach pomiarowych w latach 2009-2018



2. Planowany poligon pomiarowy (opracowanie własne na podstawie serwisu GoogleMaps)



3. Stan toru oraz przeszkody terenowe na odcinku a



4. Stan toru oraz przeszkody terenowe na odcinku c



5. Stan toru oraz przeszkody terenowe na odcinku d



6. Wózki wagonu GWF serii 300 wykorzystane jako pojazdy pomiarowe

gające bezpośrednio do toru tramwajowego na całej długości odcinka) oraz dobrym stanem toru. Odcinki te zostały wybrane do badania wpływu przesłon terenowych na dokładność pomiaru. Stan nawierzchni szynowej oraz odległość od osi toru do przesłód na odcinku d pokazano na rysunku 5.

Odcinek f charakteryzuje się przeciętną liczbą przesłon terenowych (kępy drzew oraz budynki zlokalizowane wzdłuż toru) oraz dobrym stanem toru. Odcinek ten został wybrany jako referencyjny dla odcinka c.

Zespół pomiarowy

Jednym z celów kampanii pomiarowej było również przetestowanie w warunkach ruchowych jakości oraz stabilności zaprojektowanych przez Zespół stojaków do anten GNSS. Z tego powodu wagony pomiarowe musiały charakteryzować się budową, która byłaby porównywalna do konstrukcji wagonu platformy eksploatowanego na PKP. Najważniejszym kryterium była płaska konstrukcja plat-

formy pomiarowej, na której miały zostać oparte poprzeczne belki montażowe. Ostatecznie wybrano trzy wózki z przedwojennych wagonów DWF serii 300, również będące własnością przedsiębiorstwa Gdańskie Autobusy i Tramwaje. Wózki te, po kasacji pudła wagonu, były użytkowane do przewozu materiałów nawierzchniowych, dlatego ich górne powierzchnie zostały zabudowane na wzór wagonu platformy. Zestaw kilku wózków wybranych do zespołu pomiarowego pokazano na rysunku 6.

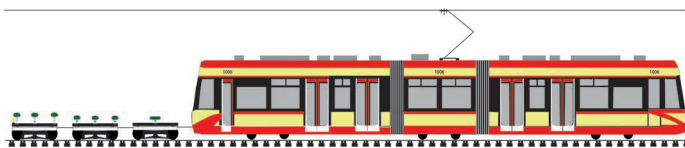
Z uwagi na to, że wózki DWF 300 nie posiadają własnego napędu, należało dobrać wagon silnikowy, który spełniałby następujące założenia:

- możliwość ciągłej jazdy ze stałą, niewielką prędkością (taką możliwość posiadają wyłącznie nowe pojazdy tramwajowe, wyposażone w półprzewodnikowy system napędowy),
- możliwość zasilania urządzeń pomiarowych oraz komputerów rejestrujących z pokładowej sieci 230 V T (taką możliwość posiadają nowe pojazdy tramwajowe, jed-

nak klasyczne gniazdo wtykowe w dogodnej lokalizacji posiadał wyłącznie wagon Bombardier NGT-6).

Zatem wybrany zespół pomiarowy składać się miał z nie mniej niż trzech wagonów pomiarowych, doczepionych do tramwaju NGT-6 (rys. 7). Na pierwszym wagonie od strony pojazdu silnikowego zdecydowano się na montaż akcelerometrów, inklinometrów oraz kompasu GNSS. Na dwóch kolejnych, z uwagi na mniejszy wpływ przesłon horyzontu wynikających z obecności wysokiego tramwaju silnikowego, zdecydowano się na montaż 10 odbiorników GNSS.

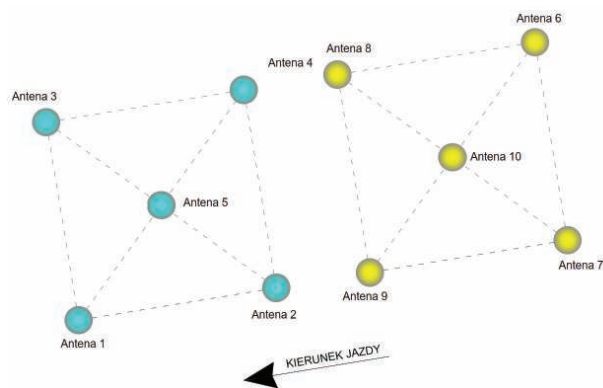
Założeniem projektu badawczego jest wykorzystanie odbiorników GNSS do wyznaczenia parametrów geometrycznych toru kolejowego. Jednym z celów prowadzonych prac jest poprawa dokładności wyznaczenia współrzędnych toru kolejowego w oparciu o znaną konfigurację przestrzenną użytych odbiorników GNSS. Wprowadzając w metodyce pomiaru konkretne uwarunkowania geometryczne,



7. Schemat pociągu pomiarowego



8. Montaż stelaży (wraz ze spodarkami) na wózkach pomiarowych – Zakładnia Tramwajowa Wrzeszcz



9. Schemat rozmieszczenia odbiorników Leica Viva GS-18 (anteny 1-5) i Trimble R10 (anteny 6-10) na wózkach tramwajowych



10. Kontrolery systemu akcelometrów i inklinometru oraz kompasu GNSS

zapewniana jest możliwość uzyskania dodatkowych wyznaczeń pozycji osi toru. W przypadku pomiarów wykorzystujących wózki tramwajowe i pięć odbiorników GNSS zainstalowanych na każdym z nich, zastosowano konstrukcję geometryczną w kształcie kwadratu. Centralny odbiornik umieszczono nad czopem skrzytu wózka precyzyjną metodą tachymetryczną. Pozostałe cztery odbiorniki umieszczono w wierzchołkach kwadratu, którego przekątne przecinały się nad czopem skrzytu. Dzięki temu możliwe było wyznaczenie stałych zależności przestrzennych pomiędzy aparaturą, niezmiennych przez cały czas trwania pomiaru.

Wyznaczone odległości zostały wykorzystane w późniejszym procesie opracowania danych pomiarowych. Obliczone na każdą epokę pomiarową współrzędne odbiorników GNSS obciążone były błędem o nieznannej wartości. Biorąc pod uwagę stałe warunki geometryczne konstrukcji pomiarowej, możliwe było sformułowanie dla każdej epoki pomiarowej układu równań liniowych. Parametrami w proce-

sie geodezyjnego wyrównania obserwacji były współrzędne odbiorników GNSS. W obliczeniach wykorzystano m.in. metodę parametryczną z warunkami wiążącymi parametry [6]. Uzyskane estymatory parametrów uwzględniały znane zależności przestrzenne pomiędzy odbiornikami. Tym samym uzyskano wyniki o wyższym stopniu wiarygodności niż pomiar osi toru kolejowego z użyciem pojedynczego odbiornika GNSS.

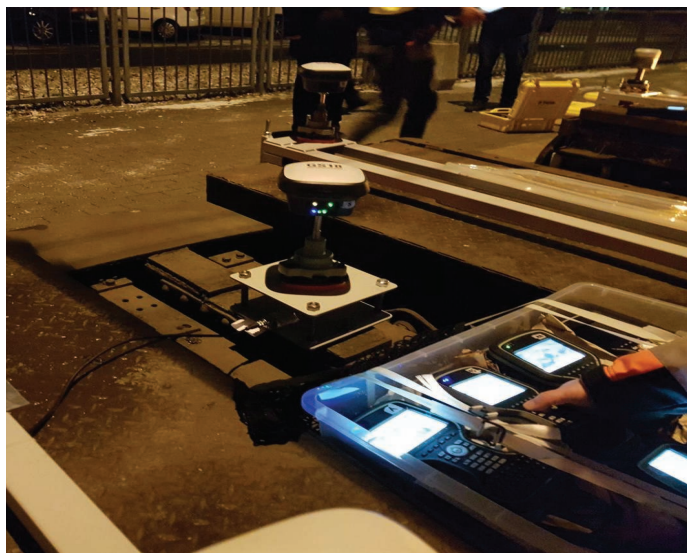
Aparatura i montaż systemu pomiarowego

Do pomiaru pozycji mobilnych platform wykorzystano w sumie 10 odbiorników GNSS: pięć anten Leica Viva GS-18 oraz pięć anten Trimble R10 [7]. Odbiorniki GNSS, zamontowane na stelażach, pokazano na rysunku 8, zaś na rysunku 9 przedstawiono schemat rozmieszczenia oraz numerację poszczególnych anten. Odbiorniki wraz z kontrolerami usytuowano na specjalnie zaprojektowanych konstrukcjach wsporczych dostosowanych do montażu spodarek. Stelaże wykonano

w taki sposób, aby spodarki posiadały stopnie swobody w płaszczyźnie poziomej, dzięki czemu umożliwiono stworzenie założonej konfiguracji przestrzennej wszystkich odbiorników.

Prace wstępne w ramach przygotowania kampanii pomiarowej dotyczyły dokładnego zwymiarowania wózków serii 300 w celu dostosowania do ich wymiarów systemu mocowania odbiorników GNSS.

Na pierwszym wózku serii 300, ustawionym bezpośrednio za tramwajem silnikowym, zamontowano akcelerometry, inklinometr oraz kompas GNSS. Pomiar akcelerometryczny oraz inklinometryczny rejestrowane były przez niezależny system synchronizowany modułem GNSS. Pomiar te miały dostarczyć informację o zjawiskach dynamicznych występujących na ciągniętych wózkach w czasie wykonywania pomiaru. Na rysunku 10 pokazano jednostki sterujące pomiarami akcelerometrycznymi.



11. Odbiorniki GNSS zamontowane na stelażach



12. Pomierzone fragmenty dróg tramwajowych w Gdańsku (do wizualizacji wykorzystano aplikację GoogleEarth)

Przebieg pomiarów

Okolo godziny 23.00 zakończono proces montażu oraz kalibracji przyrządów pomiarowych, wykonywany w Zajezdni Tramwajowej Wrzeszcz. Następnie pociąg pomiarowy wyjechał w stronę Brzeźna, gdzie został zlokalizowany poligon pomiarowy. Podczas przejazdu zauważono, że praca falowników trakcyjnych generuje na tyle silne pole elektromagnetyczne, że zaburza to komunikację przewodową pomiędzy urządzeniami pomiarowymi a rejestratorem (komputerem PC). Zdecydowano się wówczas na manualne wyłączenie falownika trakcyjnego nr 2 w tramwaju, dzięki czemu stała się możliwa rejestracja wszystkich założonych parametrów, natomiast zredukowana o połowę moc pojazdu trakcyjnego wciąż wystarczała do prowadzenia pomiarów.

Montaż odbiorników satelitarnych na spodarkach i załączenie kontrolerów nastąpił po dojechaniu zestawu pomiarowego w rejon poligonu pomiarowego – w Brzeźnie (rys. 11). Pomiędzy północą a godziną 03:38 wykonano 6 pełnych przejazdów pomiarowych wzdłuż wyznaczonej trasy. Pierwsze dwa przejazdy wykonano ze stałą prędkością pociągu pomiarowego nie przekraczającą 10 km/h. Kolejne dwa przejazdy wykonano ze stałą prędkością nie przekraczającą 20 km/h, a ostatnie dwa przejazdy ze stałą prędkością nie przekraczającą 30 km/h. W sumie pomiarami objęto ponad 18 km torów, zaś wyniki tych pomiarów posłużyły do określenia dokładności i niezawodności zastosowanej metody pomiarowej. Na rysunku 12 pokazano wynik pomiaru w postaci pozycji trasy dojazdowej i poligonu pomiarowego naniesionych na

ortofotomapę.

Uzyskane wyniki pomiarów

W czasie kampanii pomiarowej wykonano 6 przejazdów pomiarowych po wyznaczonej trasie – duża pętla uliczna w Brzeźnie z wykorzystaniem dziesięciu odbiorników GNSS (5 anten Leica Viva GS-18 oraz 5 anten Trimble R10). Odbiorniki pracowały w następujących konfiguracjach:

- 2 przejazdy w trybie śledzenia konstelacji GPS; przejazdy odbyły się pomiędzy godzinami 00:09 a 00:52,
- 2 przejazdy w trybie śledzenia konstelacji GPS, GLONASS oraz Galileo; przejazdy odbyły się pomiędzy godzinami 00:58 a 01:42,
- 2 przejazdy w trybie śledzenia konstelacji GPS oraz GLONASS; przejazdy odbyły się pomiędzy godzinami 01:42 a 02:23.

Kończąc pomiary sesja przebiegała w drodze powrotnej z Brzeźna do Zajezdni Wrzeszcz z wykorzystaniem 1 odbiornika ustawionego w trybie śledzenia konstelacji GPS + GLONASS. Przejazd ten odbył pomiędzy godzinami 03:37 a 04:32; zarejestrowano wówczas 65 645 pozycji.

W tabeli 1 przedstawiono liczebność rejestrowanych zbiorów danych w zależności od konfiguracji, w której pracowały wielosystemowe odbior-

Tab. 1. Liczba wyznaczeń pozycji uzyskanych z poszczególnych odbiorników GNSS (oznaczenia anten jak na rysunku 10)

Numer odbiornika	GPS	GPS+GLO+Gal	GPS+GLO
Antena 1	39 658	39 950	55 627
Antena 2	40 651	48 077	45 369
Antena 3	38 800	39 097	55 918
Antena 4	40 005	38 671	58 935
Antena 5	40 943	40 224	58 110
Antena 6	37 499	31 988	47 171
Antena 7	36 887	31 881	46 629
Antena 8	30 876	31 895	44 753
Antena 9	39 154	32 273	47 096
Antena 10	37 086	30 270	46 802

niki GNSS. W poszczególnych kolumnach zestawiono liczby wyznaczeń pozycji spełniających ustalone kryteria dokładności – promień niepewności nie większy niż 20 cm. Każda kolumna reprezentuje przebytą dwukrotnie trasę pomiarową. Zróżnicowana liczba zarejestrowanych danych wynikała z wielu czynników, jak chociażby z różnych warunków pracy odbiorników (usytuowanie na platformie), z różnych interwałów czasu pracy odbiorników (obsługa kontrolerów), z arbitralnego założenia poziomu odcięcia wyników itp.

Wybrany poligon pomiarowy oraz geometria ułożenia odbiorników skutkowało pojawianiem się znaczących różnic w liczbie śledzonych satelitów. Wpływało to na obliczane wartości parametrów dokładnościowych w postaci współczynników DOP (Dilution of Precision). Współczynniki geometryczne DOP określają układ przestrzenny, jaki tworzy odbiornik GNSS oraz satelity, z których odbiornik odebrał sygnał. Na podstawie wyznaczonych odległości do satelitów oraz znanych współrzędnych satelitów możliwe jest wyznaczenie pozycji odbiornika. Zadanie to jest klasycznym wcięciem przestrzennym wstecz, stosowanym powszechnie w obliczeniach geodezyjnych. Po uwzględnieniu przejścia z układu geocentrycznego do topocentrycznego, z przekątnej macierzy wariancyjno-kowariancyjnej obliczane

Tab. 2. Uzyskane wartości PDOP oraz widoczna liczba satelitów

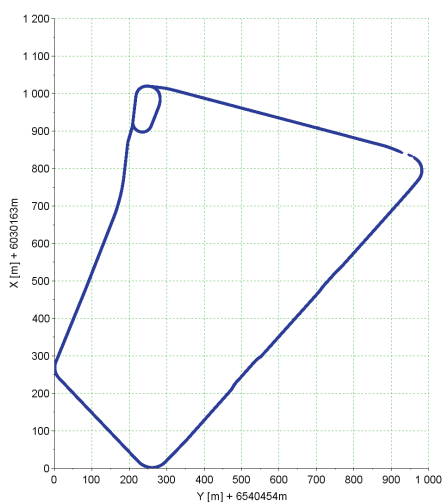
Odbiornik	GPS						GPS/GLONASS					
	1	2	3	4	5	średnia	1	2	3	4	5	średnia
Średnie PDOP	2,41	2,5	3,37	2,39	2,36	2,61	2,51	2,2	2,7	2,21	2,26	2,38
Minimalne PDOP	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Średnia liczba satelitów	7	6	6	7	7	6	11	11	11	12	11	11

są wartości współczynników geometrycznych związanych ze współzrędnymi horyzontalnymi HDOP (Horizontal Dilution of Precision), współzrędną wysokościową VDOP (Vertical Dilution of Precision) oraz błędem zegara odbiornika TDOP (Time Dilution of Precision). Z tych trzech otrzymanych współczynników wyznaczone są dwa współczynniki podstawowe: przestrzenny PDOP (Position Dilution of Precision) oraz geometryczny GDOP (Geometric Dilution of Precision).

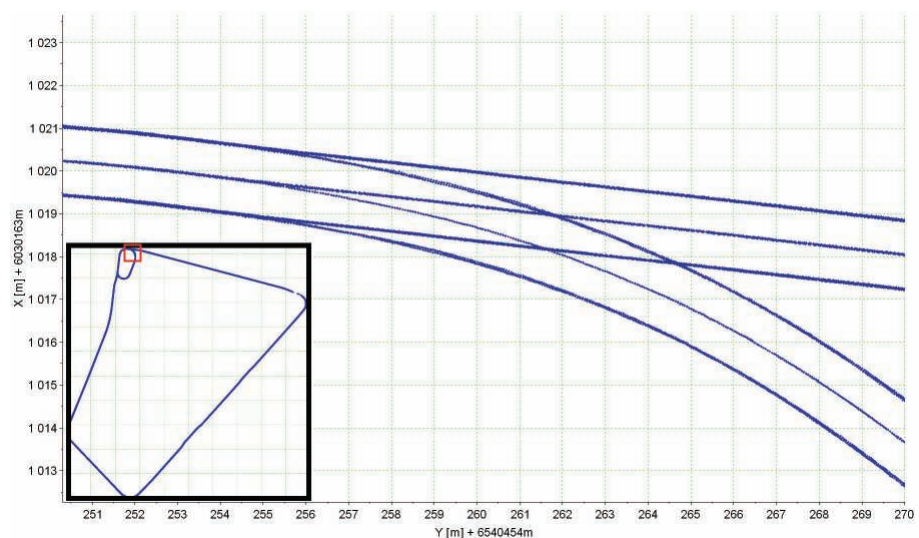
Wartości współczynników geometrycznych HDOP oraz PDOP są związane z wartością błędu wyznaczenia pozycji przez odbiornik. Zależność błędu oraz współczynnika geometrycznego jest wprost proporcjonalna. Z kolei wartość współczynnika geometrycznego, w sensie geometrii przestrzennej, związana jest z objętością bryły tworzonej w epoce pomiarowej przez satelity oraz odbiornik. Wartość współczynnika geometrycznego PDOP jest tym mniejsza im większa jest objętość przedmiotowej bryły. Równomierny rozkład satelitów na hemisferze niebieskiej sprzyja uzyskiwaniu korzystniejszych wartości współczynników

geometrycznych, a w konsekwencji obniżeniu wartości błędu pozycjonowania przez odbiornik. W tabeli 2 pokazano zmianę wartości współczynnika PDOP oraz średniej widocznej liczby satelitów przy wykorzystaniu systemu GPS oraz połączenia systemów GPS i Glonass dla wybranej platformy pomiarowej. Miara ta nie jest jednoznaczna, jednak przyjmuje się, że wartości współczynników PDOP na poziomie 2÷5 są wartościami wskazującymi wysoką jakość pozycjonowania GNSS (poziom idealny PDOP = 1). Jak wynika z tabeli 2, z punktu widzenia dokładności uzyskane wartości PDOP rzędu 2,38 dla konfiguracji GPS/GLONASS wskazują na dobre warunki pomiarowe oraz możliwość wykorzystania uzyskanych wyników do pozycjonowania osi toru.

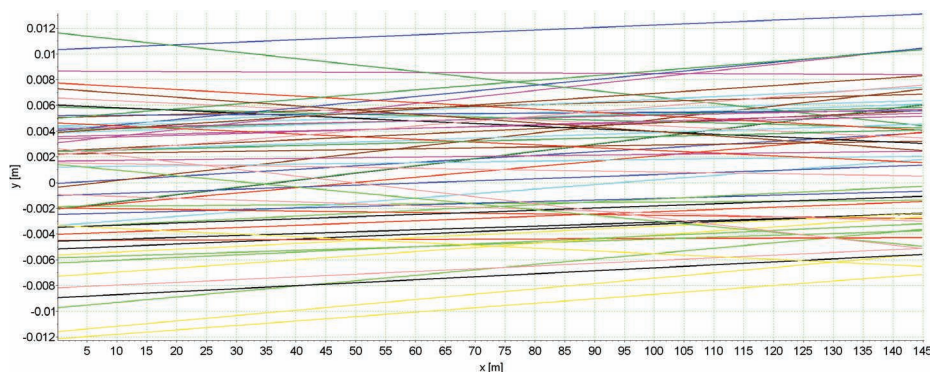
Wyznaczone współrzędne osi toru umożliwiają przedstawienie wizualizacji mierzonej trasy na siatce współrzędnych układu PL-2000. Na rysunku 13 pokazano pozycje osi toru tramwajowego zarejestrowane przez wszystkie odbiorniki w czasie 6 przejazdów wzdłuż pętli ulicznej Brzeźno. Należy jednak zauważyć, że w rzeczy-



13. Wizualizacja pomierzonego fragmentu dróg tramwajowych w rejonie dzielnicy Brzeźno w Gdańsku



14. Wizualizacja pomierzonego rozjazdu na pętli tramwajowej Brzeźno Plaža (w powiększeniu)



15. Zestawienie prostych najmniejszych kwadratów wyznaczonych na podstawie wielokrotnego przejazdu zestawu pomiarowego po tym samym odcinku mierzonej trasy (w skali skażonej). Kolory: antena 1 – czarny, 2 – niebieski, 3 – zielony, 4 morski, 5 – czerwony, 6 – fioletowy, 7 – żółty, 8 – ciemny zielony, 9 – brązowy, 10 – różowy

wistości występują tutaj 3 trajektorie przemieszczających się anten, które odpowiadają lokalizacji tych anten na wózkach. Jedną trajektorię (środkową) wyznaczają 2 anteny na czopach skrzętu, drugą 4 anteny z lewej strony pociągu pomiarowego, a trzecią 4 anteny z prawej strony pociągu. Ponieważ odległości pomiędzy tymi trajektoriami są stosunkowo niewielkie, zastosowana skala rysunku nie pozwala na ujawnienie występujących różnic. Różnice te można zaobserwować powiększając konfigurację przestrzenną odbiorników w wybranych rejonach trasy. Rysunek 14 przedstawia sytuację pomiarową w rejonie rozjazdu na pętli tramwajowej Brzeźno Plaża.

Dzięki wielokrotnym przejazdom tego samego odcinka (w różnych warunkach pomiarowych) stała się możliwa analiza powtarzalności odtwarzania odcinków prostych trasy. Rejestrowane przez dziesięć odbiorników pozycje potraktowano jako pomiary niezależne, które na podstawie znanej konfiguracji anten spowodowano do jednej, wspólnej osi toru (poprzez odpowiednie zrzutowanie). W wyniku takiej operacji dla każdego odcinka prostego uzyskano 60 zestawów współrzędnych, wyznaczając odpowiednie proste najmniejszych kwadratów. Na rysunku 15 przedstawiono wynik stosownej analizy w postaci wykresów prostych najmniejszych kwadratów, przeprowadzonej dla wybranego odcinka linii. Analogiczne

wykresy sporządzone dla pozostałych odcinków dają podobny obraz sytuacji. Wynika z nich, że odtworzenie osi toru w korzystnych warunkach prowadzenia pomiarów GNSS (dla PDOP <2) charakteryzowało się niepewnością na poziomie ± 1 cm, co świadczy o wysokiej jakości wykonanych pomiarów.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono przykład zastosowania metody Mobilnych Pomiarów Satelitarnych do wyznaczania położenia osi toru tramwajowego w globalnym układzie odniesień przestrzennych. Trwające od ponad dekad prace nad rozwojem tej metody skłoniły autorów do przeprowadzenia badań umożliwiających ocenę powtarzalności uzyskiwanych wyników w określonych warunkach prowadzenia pomiaru. Układ dziesięciu odbiorników GNSS, zamontowanych na planie kwadratu (na dwóch wózkach tramwajowych), miał umożliwić zwerifikowanie niepewności pomiarowej poszczególnych współrzędnych, a w konsekwencji również odtwarzanego układu geometrycznego.

Wybrany poligon pomiarowy oraz geometria ustawienia odbiorników satelitarnych skutkowały pojawianiem się znaczących różnic w liczbie śledzonych satelitów. Wpływało to na obliczane wartości parametrów dokładnościowych w postaci współczynników DOP. Z punktu widzenia dokładności

uzyskane wartości współczynnika przestrzennego PDOP rzędu 2,38 dla konfiguracji GPS/GLONASS wskazują na dobre warunki pomiarowe oraz możliwość wykorzystania uzyskanych wyników do pozycjonowania osi toru. Dzięki wielokrotnym przejazdom tego samego odcinka (w różnych warunkach pomiarowych) stała się możliwa analiza powtarzalności odtwarzania odcinków prostych trasy. Dla każdego odcinka prostego uzyskano 60 zestawów współrzędnych, wyznaczając odpowiednie proste najmniejszych kwadratów. Na tej podstawie stwierdzono, że odtworzenie osi toru w korzystnych warunkach prowadzenia pomiarów GNSS (dla PDOP <2) charakteryzowało się niepewnością na poziomie ± 1 cm, co również świadczy o wysokiej jakości wykonanych pomiarów.

Dodatkowo, w prezentowanej kampanii pomiarowej testowano wykorzystanie pomiarów inklinometrycznych i akcelerometrycznych, umożliwiających ocenę dynamiczną systemu pomiarowego przy różnych prędkościach jazdy tramwaju.

Podziękowania

Autorzy pragną podziękować Spółce Gdańskie Autobusy i Tramwaje za umożliwienie przeprowadzenia niniejszych pomiarów.

Finansowanie

Prace przeprowadzono w ramach projektu badawczego „Opracowanie innowacyjnej metody wyznaczania precyzyjnej trajektorii pojazdu szynowego” InnoSatTrack (POIR.04.01.01-00-0017/17), finansowanego przez NCBiR oraz PKP PLK SA. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Akpınar B., Gulal E.: Multisensor railway track geometry surveying system. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 2011, Vol. 61, No. 1, pp. 190-197.
- [2] Arastounia M., Oude Elberink S.: Application of template matching

- for improving classification of urban railroad point clouds. *Sensors* 2016, Vol. 16, No. 12, pp. 3-18.
- [3] Baran L. W., Oszczak S., Zieliński J. B.: Wykorzystanie technik kosmicznych w geodezji i nawigacji w Polsce. *Nauka* 2008, Nr 4, s. 43-63.
- [4] Chen Q., Niu X., Zhang Q., Cheng Y.: Railway track irregularity measuring by GNSS/INS integration. *The Journal of the Institute of Navigation* 2015, Vol. 62, No. 1, pp. 83-93.
- [5] Chun L., Nan L., Hangbin W., Xiaolin M.: Detection of High-Speed railway subsidence and geometry irregularity using terrestrial laser scanning. *Journal of Surveying Engineering* 2014, Vol. 140, Iss. 3, pp. 1-18.
- [6] Czaplewski K., Specht C., Dąbrowski P., Specht M., Wiśniewski Z., Koc W., Wilk A., Karwowski K., Chrostowski P., Szmagliński J.: Use of a least squares with conditional equations method in positioning a tramway track in the Gdansk agglomeration. *TransNav – the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 2019, Vol. 13, No. 4, pp. 895-900.
- [7] Dąbrowski P., Specht C., Koc W., Wilk A., Czaplewski K., Karwowski K., Specht M., Chrostowski P., Szmagliński J., Grulkowski S.: Installation of GNSS receivers on a mobile platform – methodology and measurement aspects. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin* 2019, Vol. 60, Iss. 132, pp. 18-26.
- [8] DB Netz AG, 883.2000 DB_REF-Festpunktfeld.
- [9] Gao Z., Ge M., Li Y., Shen W., Zhang H., Schuh H.: Railway irregularity measuring using Rauch-Tung-Striebel Smoothed Multi-Sensors Fusion System: Quad-GNSS PPP, IMU, Odometer, and Track Gauge. *GPS Solutions* 2018, Vol. 22, No. 2, pp. 1-14.
- [10] Gikas V., Daskalakis S.: Determining rail track axis geometry using satellite and terrestrial geodetic data. *Survey Review* 2008, Vol. 40, No. 310, pp. 392-405.
- [11] Glaus R.: The Swiss Trolley - A Modular System for Track Surveying. *Geodätischgeophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Akademie der Naturwissenschaften Schweiz*, 2006.
- [12] 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, s. 170-187.
- [13] Koc W., Specht C.: Selected problems of determining the course of railway routes by use of GPS network solution. *Archives of Transport* 2011, Vol. 23, iss. 3, pp. 303-320.
- [14] Koc W., Specht C.: Wybrane problemy wyznaczania przebiegu trasy kolejowej z wykorzystaniem rozwiązań sieciowych GPS. *Logistyka* 2010, Nr 4, s. 1-13.
- [15] Koc W., Specht C.: Wyniki pomiarów satelitarnych toru kolejowego. *TTS Technika Transportu Szynowego* 2009, Nr 7-8, s. 58-64.
- [16] Li Q., Chen Z., Hu Q., Zhang L.: Laser-Aided INS and Odometer Navigation System for subway track irregularity measurement. *Journal of Surveying Engineering* 2017, Vol. 143, Iss. 4.
- [17] NR/L2/TRK/3201_Network Rail – Management of Tight Clearances and Track Position, Network Rail 2010.
- [18] PKP PLK: Standard Techniczny „O organizacji i wykonywaniu pomiarów w geodezji kolejowej” GK-1, Warszawa 2015.
- [19] PKP PLK: Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych Id-1, Warszawa 2005.
- [20] PN-EN 13803 Railway applications – Track – Track alignment design parameters – Track gauges 1435 mm and wider.
- [21] PN-EN 13848 Railway applications – Track – Track geometry quality.
- [22] Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1299/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. dotyczące technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Infrastruktura” systemu kolei w Unii Europejskiej.
- [23] Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/919 z dnia 27 maja 2016 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności w zakresie podsystemów „Sterowanie” systemu kolei w Unii Europejskiej.
- [24] Specht C., Koc W., Chrostowski P., Szmagliński J.: Accuracy assessment of Mobile Satellite Measurements in relation to the geometrical layout of rail tracks. *Metrology and Measurement Systems* 2019, Vol. 26, Iss. 2, pp. 309-321.
- [25] Specht, C.; Koc, W.; Chrostowski, P.; Szmagliński, J. The analysis of tram tracks geometrical layout based on Mobile Satellite Measurements. *Urban Rail Transit* 2017, Vol. 3, Iss. 4, pp. 214-226.
- [26] Specht C., Koc W., Szmagliński J., Gajdzica P., Specht M.: GNSS inventory of historic narrow-gauge railway line in Koszalin under extremely unfavorable measurements conditions from the point of view of satellite signals availability. *Proceedings of the 1st International Conference on Innovative Research and Maritime Applications of Space Technology IRMAST 2015*, Gdańsk: Gdańsk University of Technology, 2015, pp. 3-8.
- [27] Specht C., Dąbrowski P., Specht M., Koc W., Chrostowski P., Szmagliński J., Dera M., Skóra M.: Mobilne pomiary satelitarne na liniach Pomorskiej Kolei Metropolitalnej. *Przegląd Komunikacyjny* 2016, Rok 71, Nr 5, s. 9-16.
- [28] T HR TR 13000 ST, Railway Surveying, Version 1.0, 2016.