Projekt badawczy BRIK: Opracowanie innowacyjnej metody wyznaczania precyzyjnej trajektorii pojazdu szynowego

Research project BRIK: development of an innovative method for determining the precise trajectory of a railway vehicle

Andrzej Wilk

Dr hab. inż., prof. nadzw. PG

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. nadzw. PG

Politechnika Gdańska, Katedra Inżynierii Elektrycznej Transportu

krzysztof.karwowski@pg.edu.pl

Chrostowski Piotr

Politechnika Gdańska, Katedra Transportu Szynowego i Mostów

piotr.chrostowski@pg.edu.pl

Jacek Szmagliński

Politechnika Gdańska, Katedra Transportu Szynowego i Mostów

jacek.szmaglinski@pg.edu.pl

Paweł Dąbrowski

Mgr inż.

Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Geodezji i Oceanografii

p.dabrowski@wn.umg.edu.pl

Mariusz Specht

Mgr inż.

Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Transportu i Logistyki

m.specht@wn.umg.edu.pl

Sławomir Judek

Politechnika Gdańska, Katedra Inżynierii Elektrycznej Transportu

slawomir.judek@pg.edu.pl

Jacek Skibicki

Politechnika Gdańska, Katedra Inżynierii Elektrycznej Transportu

jacek.skibicki@pg.edu.pl

Marcin Skóra

Mgr inż.

Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Geodezji i Oceanografii

marcin21@gmail.com

Sławomir Grulkowski

Politechnika Gdańska, Katedra Transportu Szynowego i Mostów

slawomir.grulkowski@pg.edu.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono podstawowe informacje dotyczące projektu badawczego realizowanego na zlecenie Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Spółki PKP Polskie Linie Kolejowe S. A. przez Konsorcjum Politechniki Gdańskiej i Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Projekt obejmuje wykorzystanie nowoczesnych metod pomiarowych, takich jak techniki pozycjonowania satelitarnego GNSS, pomiary inercyjne INS oraz skaning laserowy LS, w procesie zarządzania siecią dróg kolejowych. Chodzi tutaj o określanie parametrów układu geometrycznego linii kolejowych oraz odtwarzanie trajektorii ruchu pojazdów szynowych. Do uzyskania tego celu zostanie wykorzystana innowacyjna technika mobilnych pomiarów satelitarnych. Przedstawiono opis projektu oraz poszczególne etapy jego realizacji. Omówiono zakres prac badawczych wykonanych w 2018 roku. Politechnika Gdańska przeprowadziła analizę metod określania i oceny kształtu toru, przedstawiła koncepcję badań trajektorii linii kolejowych z wykorzystaniem nawigacji satelitarnej, podjęła kwestię wpływu dynamiki ruchu wagonu pomiarowego na pomiary położenia toru z wykorzystaniem mobilnych technik GNSS/INS oraz zaprezentowała projekt platformy pomiarowej wraz z jego wstępną weryfikacją. Uniwersytet Morski w Gdyni podjął kwestię technologii GNSS/INS/MLS w pomiarach ukształtowania toru, opracował schemat ideowy rozmieszczenia aparatury na mobilnej platformie pomiarowej i określił możliwości poprawy dokładności stosowanego obecnie na PKP sposobu określania lokalizacji pociągów.

Słowa kluczowe: *Projekt badawczy; Układ geometryczny toru; Pomiary GNSS/INS/MLS*

Abstract: In the paper the essential assumptions regarding a research project implemented by a consortium of Gdansk University of Technology and Gdynia Maritime University are presented. The project has been commissioned by National Center of Research and Development with cooperation with Polish Railways (PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.). The project is focused in implementation of modern measurement techniques using Global Navigation Positioning System GNSS, Inertial Navigation System INS and Mobile Laser Scanning MLS in a railway network management process. The precise aim of the research is both determine geometric parameters of a railway geometric layout as well as a railway vehicle movement trajectory. For this reason the innovative technique of mobile satellite measurements will be used. In the paper a synthetic description of the project together with the particular stages are presented. Also, a part of research which was realized in 2018 is shown. In the first stage, Gdansk University of Technology made a research of existing common methods for determining and assessing a track alignment, presented an idea of mobile investigation of track axis by the use of satellite measurements, took into consideration an issue of influence of dynamic behavior of the measurement vehicle on the accuracy of determined track positions by the use of GNSS/INS techniques and finally presented a technical project of measurement platform. Gdynia Maritime University made a query of GNSS/INS/MLS in measurements of track alignment, elaborated a scheme of measurement devices placement on the mobile measurement platform and studied possibilities of increasing accuracy for estimation a railway vehicle localization in relation to common techniques used by polish train operators.

Keywords: *Research project; Railway layout; GNSS/INS/MLS measurements*

Od dłuższego już czasu funkcjonuje przeświadczenie, że w dobie dynamicznie rozwijających się systemów służących pozycjonowaniu metodami GNSS [11] staje się możliwe opracowanie niezawodnej i dokładnej metody określania kształtu osi toru kolejowego w Państwowym Układzie Współrzędnych Geodezyjnych 2000 [9]. Przedstawioną tezę potwierdziły w sposób jednoznaczny prace badawcze prowadzone od 2009 roku przez interdyscyplinarny zespół naukowy złożony pierwotnie z pracowników Politechniki Gdańskiej i Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni. Obecnie biorący udział w projekcie pracownicy AMW należą do kadry Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Na przestrzeni wielu lat zespół przeprowadził szereg kampanii pomiarowych w eksploatowanym torze kolejowym, stanowiących podstawę do opracowania innowacyjnej techniki mobilnych pomiarów satelitarnych oraz wykorzystujących tą technikę nowych metod projektowania układów geometrycznych toru. Wyniki prowadzonych badań upowszechniano na bieżąco w kilkudziesięciu publikacjach, krajowych i zagranicznych (m. in. [3–6, 14–16]), co pozwoliło na wszechstronną prezentację nowej techniki pomiarowej w środowisku naukowym i inżynierskim zajmującym się dziedziną infrastruktury transportu szynowego. Efektem podsumowującym dotychczasowe osiągnięcia w omawianym zakresie jest publikacja książkowa o charakterze monografii [7]. Doświadczenia te stały się podstawą, zakończonego sukcesem, udziału

w konkursie organizowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz PKP Polskie Linie Kolejowe S. A. Wniosek o dofinansowanie nr POIR.04.01.01-00-0017/17 projektu badawczego pt. „Opracowanie innowacyjnej metody wyznaczania precyzyjnej trajektorii pojazdu szynowego" (akronim: InnoSatTrack) został złożony przez Konsorcjum Politechniki Gdańskiej (Lider) i Uniwersytetu Morskiego w Gdyni (realizacja w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia BRIK w Programie Operacyjnym Inteligentny Rozwój 2014–2020, okres realizacji 2018.06.24–2021.05.31).

W ramach Politechniki Gdańskiej projekt jest realizowany przez pracowników Katedry Inżynierii Elektrycznej Transportu, Wydziału Elektrotechniki i Automatyki oraz Katedry Transportu Szynowego i Mostów, Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska. Ze strony Uniwersytetu Morskiego w Gdyni w projekcie biorą udział pracownicy Katedry Geodezji i Oceanografii z Wydziału Nawigacyjnego.

Realizowany projekt dotyczy problematyki odtwarzania ukształtowania geometrycznego linii kolejowych na drodze mobilnych pomiarów satelitarnych. Precyzyjna identyfikacja osi toru pociąga za sobą szereg możliwości związanych z aktualizacją danych cyfrowych o lokalizacji linii i obiektów inżynierskich w układzie współrzędnych 2000. Dane te mogą być również wykorzystywane do planowania, projektowania i budowania baz danych służących zarządzaniu infrastrukturą oraz stanowić dane wejściowe dla programów liczących przejazdy teoretyczne pociągów. Technika GNSS pozwala również na lokalizację pojazdów szynowych w czasie rzeczywistym (położenie, prędkość) np. na potrzeby sterowania ruchem czy jako źródło danych dla systemów informacji pasażerskiej.

Przyjęty obszar badań pozwoli określić aktualne i przyszłe możliwości stosowania technik GNSS (oraz uzupełniających je technik inercyjnych) w wyżej wymienionych dziedzinach. Szeroki zakres badań eksperymentalnych i prac laboratoryjnych poprzedzony będzie analizą przyjętych założeń oraz pracami studialnymi. Do realizacji projektu zastosowana zostanie aparatura pomiarowa najnowszej generacji wraz z wykorzystaniem istniejącej w Polsce sieci stacji referencyjnych. Analizie poddane zostaną różne warianty konfiguracji systemu pomiarowego z optymalizacją jego krytycznych parametrów. Finalnie oś toru będzie reprezentowana przez szereg parametrów geometrycznych, zgodnie z zasadami definiowania i identyfikacji układów geometrycznych torów kolejowych. Wyniki pomiarów przetwarzane będą, w opracowanym w ramach projektu, wielowarstwowym systemie informatycznym, który umożliwi ich prezentację w funkcjonalnej aplikacji internetowej.

Opis projektu InnoSatTrack

Projekt obejmuje wykorzystanie nowoczesnych metod pomiarowych, takich jak techniki pozycjonowania GNSS [11], pomiary inercyjne INS [2] czy skaning laserowy LS [8], w procesie zarządzania siecią dróg kolejowych. Proces zarządzania rozumiany jest tutaj jako szereg zadań związanych zarówno z planowaniem, projektowaniem, budową i utrzymaniem linii kolejowych, jak również tych dotyczących prowadzenia ruchu pociągów. Najnowsze osiągnięcia w owej dziedzinie dowodzą, że potencjał technik pozycjonowania satelitarnego otwiera nieznane dotąd możliwości związane z precyzyjnym określaniem położenia toru względem przyjętego układu odniesień przestrzennych. Pojawia się zatem możliwość szybkiego – względem geodezji tradycyjnej opartej na tachimetrii – odwzorowania ukształtowania linii kolejowej. Należy przy tym odróżnić dwie kwestie, a mianowicie odtwarzanie układu geometrycznego linii kolejowych oraz odtwarzanie trajektorii ruchu pojazdu szynowego, pomimo tego, że najczęściej zakłada się równoznaczność owych terminów. Jest to jednak oparte na traktowaniu ukształtowania rzeczywistego toru w sposób modelowy (pełna zgodność z dokumentacją techniczną) bądź na możliwości utożsamiania układu geometrycznego z niejednoznacznie wyznaczoną trajektorią ruchu pojazdu (np. w ujęciu dyskretnym – zbiór punktów, bądź w ujęciu wektorowym z wykorzystaniem funkcji sklejanych). W opisywanym projekcie owe aspekty zostają rozdzielone. Układ geometryczny linii kolejowej reprezentowany będzie przez zidentyfikowany na drodze pomiarów i analiz numerycznych zestaw modeli teoretycznych, zgodnych z zasadami projektowania linii kolejowych, natomiast trajektoria ruchu pojazdu zostanie odwzorowana z określoną dokładnością na podstawie rzeczywistego położenia pojazdu w określonym czasie. Obydwa te zagadnienia posiadają swoje własne założenia i ograniczenia, a także specyficzne kryteria odnośnie żądanej dokładności.

Dla określenia osi toru w kontekście układu geometrycznego konieczne spełnienia następujących założeń i wymagań technicznych:

- Pomiar wykonywany będzie w trakcie przejazdu z prędkością, dla której gęstość wyznaczania pozycji wynosi ok. 2–4 na metr bieżący toru (tj. co 25–50 cm). Założenie to związane jest z niejednoznacznością umiejscowienia elementów geometrycznych (prostych, łuków kołowych, krzywych przejściowych, pochyleń podłużnych itp.) na długości linii. Elementy te mogą być w sposób odwzorowane z pożądaną dokładnością jedynie przy dostatecznej gęstości wyznaczania pozycji;
- Wyniki pomiaru wyrównane będą z wykorzystaniem bazy w postaci zespołu wektorów zdefiniowanych względem platformy pomiarowej (rys. **1**). Metodyka ta pozwoli na maksymalne wykorzystanie złożonego układu pomiarowego (zestaw równolegle pracujących anten GNSS) na potrzeby poprawy dokładności wyznaczania pozycji osi toru. W ten sposób uzyskany sygnał pomiarowy będzie odpowiednio przygotowany do dalszej analizy geometrycznej;
- Pozycje wyznaczone techniką GNSS będą skonfrontowane z sygnałem urządzeń inercyjnych, co również zredukuje stopień niepewności związany z losowym pogorszeniem się jakości sygnału satelitarnego. Metodyka oparta na czujnikach INS wykorzystywana będzie zwłaszcza w sytuacjach utraty dostępności sygnału satelitarnego, wynikającej z przesłon terenowych w postaci pobliskiej zabudowy, przekopów, terenów zalesionych, wiaduktów, mostów, tuneli itp.;
- Elementy geometryczne i ich parametry identyfikowane będą przy założeniu minimalizacji wartości różnic pomiędzy pozycjami wy-

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

równanego pomiaru satelitarnego i współrzędnymi zidentyfikowanego układu geometrycznego. Określone w ten sposób różnice będą analizowane w kontekście stopnia deformacji układu geometrycznego względem modelu teoretycznego.

Do wyznaczania trajektorii pojazdu szynowego wykonywany będzie pomiar GNSS+INS podczas jazdy pojazdu (alternatywnie: pociągu, drezyny, pojazdu trakcyjnego itp.) z podwyższonymi prędkościami. Prędkości podwyższone (pierwotnie ustalone na poziomie 100–120 km/h) dotyczą przedziału prędkości poprzedzających prędkość wysoką, której granicę określa v = 200 (250) km/h, w zależności od sposobu wdrożenia owej prędkości (modernizacja linii istniejącej, budowa nowej linii). W związku z tym istnieje szereg problemów dotyczących uzyskania jednoznaczności położenia pojazdu z wymaganą gęstością przestrzenną oraz związanych z odpowiednio szybką transmisją danych. Projekt zakłada badania aktualnych możliwości określania pozycji pojazdu poruszającego się z prędkością wyższą niż 120 km/h, z wykorzystaniem najnowszych technik GNSS oraz post-processingu z poprawkami nadawanymi przez stacje referencyjne sieci naziemnej.

Dotychczasowe doświadczenia zespołu badawczego koncentrowały się głównie na możliwościach odtwarzania układów geometrycznych w warunkach rozwijających się systemów satelitarnych, w szczególności po oddaniu do użytku publicznego sieci stacji referencyjnych ASG EUPOS. Wprowadzenie owej sieci spowodowało radykalną poprawę w zakresie poziomu uzyskiwanej dokładności wyznaczania pozycji toru. Również podejmowane prace związane z projektem systemu odbiorników oraz ich wzajemnej konfiguracji na platformach pomiarowych skutkowały poprawą jakości otrzymywanych rezultatów badawczych. Opanowane już techniki będą nadal rozwijane w celu osiągnięcia maksymalnej możliwej dokładności przy identyfikacji rzeczywistego ukształtowania linii kolejowych.

Kolejnym istotnym zagadnieniem związanym z realizowanym projektem jest kwestia systemu informatycznego obsługującego proces pomiarowy i analityczny. Techniki wykorzystane w projekcie wymagają profesjonalnego wsparcia systemowego. Wynika to z faktu, że pomiary dostarczać będą dużą ilość informacji z racji gęstości pomiaru (częstotliwości próbkowania) oraz nadmiarowej konfiguracji czujników systemu pomiarowego (odpowiedzialnej za niezawodność metody), a także z uwagi na funkcjonalność w procesie analizy i prezentacji wyników. Z tego powodu zostanie opracowany i wykonany odpowiedni system informatyczny oparty o architekturę warstwową. Architektura ta zapewni skuteczne wsparcie procesów obliczeniowych, których funkcjonalność wynikać będzie z potrzeb zgłoszonych przez PKP PLK S.A. Zakłada się przy tym konsultacje i uzgodnienia co do funkcjonalności systemu. Architekturę systemu i sposób jej realizacji w ogólnym ujęciu przedstawia rysunek **2**.

Zakłada się, że zbiory danych pomiarowych z anten GNSS platformy pomiarowej będą odpowiednio szeregowane i gromadzone w bazie danych Microsoft SQL Server lub w innej bazie wskazanej przez PKP PLK S.A. Proponuje się opracowanie systemu informatycznego jako aplikacji internetowej typu ASP.NET (ang. Active Serwer Pages) w środowisku .NET Framework. Będzie ona mogła być uruchamiana z dowolnego komputera podłączonego do sieci internetowej. System będzie posiadał następujące warstwy: prezentacji, biznesową oraz dostępu do bazy danych. W aplikacji będą zaimplementowane wydajne i wielowartościowe kontrolki danych. Wybrane zostaną kontrolki implementujące mechanizm automatycznego wiązania danych oraz zapewniające szereg operacji, takich jak ich sortowanie i filtrowanie.

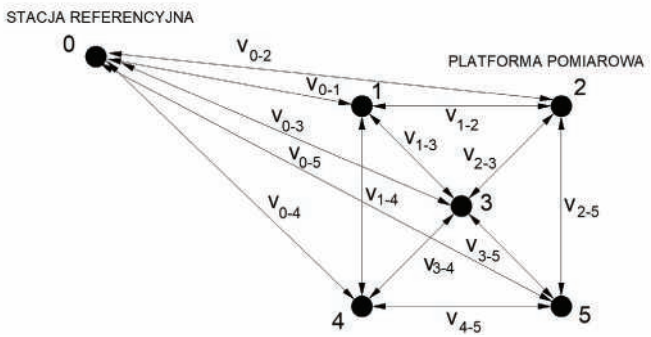
Zakłada się że rezultaty projektu osiągną wysoki poziom przedwdrożeniowy. Opracowana metodyka pomiarowa oraz sposób analizy wyników, realizowany odpowiednimi funkcjami prototypu systemu informatycznego, pozwoli na rozpoczęcie procesu wdrażania owych rezultatów. Wyniki prac badawczych oraz szczegółowe specyfikacje techniczne, umożliwiające wdrożenie metodyki pomiarowej i analitycznej przez zarządcę infrastruktury kolejowej, zostaną przekazane do PKP PLK S.A.

Etapy realizacji projektu

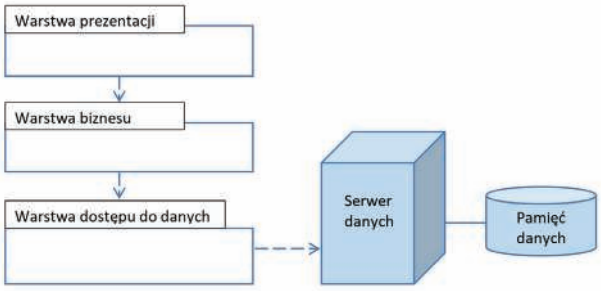
Realizacja projektu obejmować będzie dziewięć etapów. Poniżej przedstawiono ich skrócony opis.

Etap nr 1: Opracowanie metodyki oceny ukształtowania toru kolejowego z wykorzystaniem mobilnego systemu pomiarowego oraz stworzenie szczegółowej koncepcji badań

Przy wykorzystywaniu wyników pomiarów satelitarnych do określania kształtu geometrycznego osi toru kolejowego nie mogą znaleźć zastosowania preferowane przez niektóre środowiska naukowe modele teoretyczne, takie jak – przykładowo – zawarte w twierdzeniu [18]: „…Trajektoria pojazdu, wyznaczana w postaci szeregów punktów dyskretnych, przeliczona na krzywe gładkie (proste i krzywe regresji) utożsamia oś toru. Zastosowanie formuły matematycznej LRS (ang. *Linear Referencing Segmentation*) umożliwia konwersję układu



***1**. Zespół wektorów zdefiniowanych pomiędzy platformą pomiarową i stacją referencyjną do wyrównania wyników pomiarów: v_{0-j} – wektory długie pomiędzy stacją referencyjną a poruszającą się po torze platformą; v_{i-j} – wektory pomiędzy odbiornikami platformy pomiarowej, i = 1–5 , j = 1–5, i ≠ j*



***2**. Architektura systemu informatycznego i sposób jej realizacji*

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

liniowego LRS na dowolny powierzchniowy układ współrzędnych, co stwarza możliwość integracji systemów GIS (ang. *Geographic Information System*) z systemami stosowanymi w kolejnictwie, lokalizującymi obiekty względem kilometrażu". Kształt osi toru musi przecież spełniać zasady projektowania układów geometrycznych linii kolejowych i w żadnym wypadku nie może przyjmować postaci charakteryzującej się zmienną krzywizną na znacznej długości (poza precyzyjnie zdefiniowanymi odcinkami krzywych przejściowych).

Podczas realizacji pierwszego etapu projektu, przygotowywana będzie szczegółowa koncepcja i metodyka badań inwentaryzacyjnych linii kolejowych oraz pozycjonowania pociągów na szlakach. Wszystkie założenia koncepcji i metody wynikać będą z analizy aktualnie stosowanych procedur dotyczących określania osi toru i pozycjonowania pojazdów na liniach PKP PLK S.A. Zasadniczym założeniem jest opracowanie zasad oceny ukształtowania toru na podstawie nowoczesnych metod pozycjonowania satelitarnego. Zakłada się przeprowadzenie szczegółowej analizy wprowadzania technik GNSS i INS do celów określania osi toru oraz pozycji pojazdu względem istniejącego kilometrażu linii kolejowej w układzie PUWG 2000. Z racji dynamicznego rozwoju technik pomiarowych niezbędne jest odniesienie się do stanu aktualnego nie tylko w obrębie funkcjonowania PKP PLK S.A.

W ramach tego etapu przewidziane jest także zaprojektowanie mobilnej platformy pomiarowej przystosowanej do instalacji następujących komponentów systemu: anten satelitarnych oraz inklinometrów, akcelerometrów, skanerów lserowych 2D stanowiących uzupełniający system pomiarowy umożliwiający uwzględnienie wpływu dynamiki ruchu platformy na wyniki pomiarów zasadniczych.

Etap nr 2: Opracowanie metodyki mobilnych pomiarów GNSS+INS oraz szczegółowej koncepcji przetwarzania danych pomiarowych

Podstawowym celem etapu drugiego jest zbudowanie mobilnej platformy pomiarowej, przystosowanej do precyzyjnych pomiarów satelitarnych. Będzie ona zintegrowana z inercjalnymi systemami nawigacyjnymi INS i mobilnym skanerem laserowym SL. Pozwoli to na precyzyjne, dokładne oraz relatywnie szybkie i względnie tanie wyznaczenie osi toru. Zaproponowane rozwiązania technologiczne przyczynią się również do zwiększenia dokładności wyznaczania trajektorii pojazdów szynowych o podwyższonej prędkości jazdy.

Szczegółowy projekt platformy pomiarowej uwzględniać będzie wielokryterialną analizę dotyczącą optymalnego miejsca mocowania komponentów systemu GNSS/INS/LS, w aspekcie podniesienia poziomu dokładności wyznaczania osi toru. Zaproponowane zostaną dwie wielowariantowe strategie wyznaczania osi torów z wysoką precyzją, które będą oparte o pozycjonowanie GNSS w czasie rzeczywistym (RTK) oraz na post–processingowym opracowaniu obserwacji fazowych. Przewiduje się, że w ogólnych przypadkach zapewnienie oczekiwanej dokładności wyznaczania osi torów zapewni zaproponowana strategia GNSS. W przypadkach szczególnych (brak sygnału GNSS – np. pomiar w tunelach) podtrzymanie wysokiej dokładności pomiaru zapewni zastosowanie pomiarów zintegrowanych GNSS/INS/LS. Przedmiotem analiz będzie również określenie optymalnej liczby pomiarowych odbiorników GNSS.

W następnej kolejności analizie zostaną poddane możliwości poprawy poziomu dokładności określania położenia pojazdu na podstawie danych otrzymanych z pojazdów przewoźników kolejowych. W tym przypadku zaproponowana zostanie strategia pomiarów w czasie rzeczywistym, uwzględniająca odbieranie korekt pozycyjnych z fizycznych stacji referencyjnych. Do tego celu analizie poddane zostaną dostępne na terenie Polski aktywne sieci stacji referencyjnych, tj. sieci geodezyjne: ASG-EUPOS, VRSnet, Leica i TPI NETpro. Zaprojektowana zostanie trasa analiz empirycznych, uwzględniająca różne warianty przesłon terenowych, tj. tereny odsłonięte, obszary zabudowane, tereny gruntów zalesionych. W ramach etapu drugiego zostanie również przeprowadzona wielokryterialna analiza parametrów i własności eksploatacyjnych dostępnych na rynku urządzeń INS, odbiorników GNSS oraz skanerów laserowych. Etap ten zakończy się wyborem niezbędnej aparatury geodezyjnej oraz jej montażem na mobilnej platformie pomiarowej.

Etap nr 3: Budowa algorytmów informatycznych do analizy sygnału pomiarowego – definiowanie osi toru kolejowego z uwzględnieniem zasad projektowania linii kolejowych

W ramach etapu trzeciego planowane są prace nad opracowaniem algorytmów wspomagających zdefiniowanie układu geometrycznego linii kolejowej, w dostosowaniu do pomiarów satelitarnych oraz uzupełniających je pomiarów inercyjnych i skaningu laserowego. Algorytmy będą zaimplementowane w wybranym środowisku programistycznym. Testowanie wspomnianych algorytmów jest istotnym elementem projektu z uwagi na charakter danych wejściowych w postaci dużych zbiorów współrzędnych otrzymanych z pomiaru i analizy post–processingowej. Jako efekt końcowy etapu przewiduje się opracowanie raportu zawierającego omówienie autorskich algorytmów informatycznych do przetwarzania opracowanych finalnie danych pomiarowych na potrzeby identyfikacji parametrów geometrycznych linii kolejowych. Przedstawiona zostanie również szczegółowa architektura algorytmów oraz sposób ich użytkowania, a także zaprezentowane wyniki wstępnych analiz wykonywanych w testowym środowisku informatycznym.

Etap nr 4: Budowa modeli teoretycznych analizujących sygnał pomiarowy oraz definiujących trajektorię pojazdu i oś toru kolejowego z uwzględnieniem algorytmów geodezyjnego rachunku wyrównawczego

W ramach etapu czwartego opracowane zostaną algorytmy numeryczne pozwalające na wyznaczenie współrzędnych osi toru z założonym wysokim poziomem dokładności, a także umożliwiające określanie trajektorii pojazdów przy podwyższonej prędkości jazdy z zachowaniem dużej precyzji pozycjonowania. Pierwsze zagadnienie będzie ściśle związane z zaprojektowaną mobilną platformą pomiarową. Rozważone zostaną dwa podejścia wyznaczania osi toru, tj. w czasie rzeczywistym oraz poprzez post–processingowe opracowanie obserwacji satelitarnych.

W skład platformy pomiarowej wchodzić będzie od trzech do pięciu stanowisk pomiarowych GNSS. Każde z tych stanowisk będzie wyposażone w przy-

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

rządy do precyzyjnego, wymuszonego centrowania anteny GNSS. Ponadto każdy z projektowanych punktów zostanie poddany pomiarowi w wielogodzinnej sesji statycznej GNSS, wyznaczając tym samym odległości pomiędzy punktami pomiarowymi z wysoką dokładnością. Taka konstrukcja umożliwia utworzenie na platformie pomiarowej sieci wektorów GNSS, która w post–processingowym opracowaniu danych zostanie wyrównana w nawiązaniu do sieci stacji referencyjnych systemów ASG-EUPOS, VRSnet, TPI NETpro i Leica. Dodatkowo uwzględniane będą różne kombinacje integracji obserwacji z systemów GNSS (tj. np. GPS, GPS+GLONASS, GPS+BeiDou). Wyposażenie systemu pomiarowego w technikę pomiarów inercjalnych i skaningu laserowego zapewni utrzymanie założonego poziomu precyzji wyznaczania w przypadku utraty rozwiązania fazowego GNSS.

Wyznaczanie trajektorii pojazdu przy podwyższonej prędkości jazdy z zachowaniem wysokiej precyzji, będzie się odbywać poprzez zainstalowanie czterech odbiorników GNSS na dachu lokomotywy. Każdy z odbiorników będzie połączony z inną aktywną siecią stacji referencyjnych. Tak jak poprzednio, zaproponowane zostaną różne warianty integracji obserwacji uzyskanych z różnych systemów GNSS.

Etap nr 5: Prace eksperymentalno-pomiarowe mające na celu ocenę skuteczności zaproponowanych algorytmów. Specyfika realizacji pomiarów z wykorzystaniem aktywnej sieci geodezyjnej GNSS, przy geodezyjnej obsłudze trasy kolejowej, związana jest z pokonywaniem podczas pomiarów znacznych odległości. Podczas przemieszczania się po torze kolejowym odbiorniki GNSS wykorzystywane do wyznaczania trajektorii pojazdów i osi toru będą dynamicznie zmieniać konfigurację wykorzystywanych stacji referencyjnych GNSS, stąd istotnym problemem geodezyjnym o charakterze poznawczym będzie optymalizacja wykorzystania sieci ASG-EUPOS, VRSnet, Leica, TPI NETpro z punktu widzenia kryterium dokładnościowego. Przewiduje się dokonanie analizy porównawczej metod transmisji różnicowej GPS (FKP, MAC, VRS i in.), dostępnych serwisów (NAVGEO, KODGIS, NAVGIS) oraz wykorzystywanej wersji standardu transmisji telemetrycznej (RTCM) z punktu widzenia minimalizacji błędu wyznaczania współrzędnych na rozległych obszarach.

Zastosowanie systemów inercjalnych umożliwia utrzymania wysokiej dokładności wyznaczania osi toru w sytuacjach chwilowej utraty rozwiązania fazowego GNSS, np. podczas przejazdu pod wiaduktem czy też przy ograniczeniu widoczności satelitów przez budynki lub ukształtowanie terenu. Zintegrowana technologia GNSS/INS zdecydowanie podwyższy zatem dostępność, niezawodność i ciągłość wyznaczania. Integracja pomiarów GNSS/INS z wynikami analizy chmury punktów otrzymanych z pomiaru skanerem laserowym oznaczać będzie uzupełnienie możliwości systemu o wykorzystanie pomiarów nadmiarowych.

Badania empiryczne dotyczące określania trajektorii pojazdów o podwyższonej prędkości zostaną przeprowadzone na rozległych obszarach, które będą się charakteryzowały zmiennością przesłon terenowych. Podstawą realizacji tego zagadnienia są różnicowe pomiary wykonywane w czasie rzeczywistym RTK, uwzględniające korekty pozycyjne otrzymane z aktywnych sieci stacji referencyjnych. W ramach przeprowadzanych eksperymentów badany będzie obszar dostępny w obrębie zasięgu jednej stacji referencyjnej.

Należy zaznaczyć, że pomiary na obiektach testowych będą powtarzane, uwzględniając różne położenie satelitów GNSS na orbicie. Analizowany będzie również wpływ liczby satelitów, przyjętych do rozwiązania fazowego, wynikający z uwzględnienia obok satelitów GPS nadajników innych systemów satelitarnych, tj. Galileo, GLONASS oraz BeiDou. Takie rozwiązania pozwolą na modelowanie konstelacji satelitów, a w tym również współczynników DOP (decydujących o dokładności).

Przeprowadzone badania empiryczne wyznaczania osi toru dotyczyć będą zarówno pozycjonowania w czasie rzeczywistym, jak i post–processingowego opracowania obserwacji satelitarnych. W wyniku realizacji zadań geodezyjnych otrzymane zostaną współrzędne osi toru wyznaczone różnymi technikami, z różnym poziomem dokładności. W ramach etapu piątego nastąpi analiza metrologiczna niepewności pomiaru dla poszczególnych wariantów i wyłonienie najefektywniejszej, czyli najdokładniejszej metody wyznaczania osi toru.

Etap nr 6: Opracowanie systemu informatycznego wykorzystującego wyniki pomiarów polowych w zarządzaniu siecią dróg kolejowych

Opracowane algorytmy oraz modele teoretyczne układów geometrycznych będą stanowiły niewątpliwie cenne narzędzia, jednak dopiero zaimplementowane do systemu informatycznego pozwoli na pełne ich wykorzystane w praktyce inżynierskiej. System taki powinien być wykonany z myślą o całym procesie inwestycyjnym, a więc uwzględniać charakter procesów projektowych (zarówno koncepcje jak i szczegółowy projekt wykonawczy), zarządzania liniami kolejowymi oraz ich eksploatacji. Z tego względu system informatyczny będzie zaprojektowany w postaci bazy danych oraz modułów wspomagających najważniejsze procesy projektowe i analityczne oraz procesy zarządzania linią kolejową.

Zakłada się, że zbiory danych pomiarowych z anten systemu GNSS będą odpowiednio szeregowane i gromadzone w bazie danych Microsoft SQL Server lub bazie danych programu Access. Może być też uwzględniona baza danych wskazana przez PKP PLK S.A. Proponuje się opracowanie systemu informatycznego jako aplikacji internetowej z zaimplementowanymi tzw. regułami biznesowymi w celu:

- zautomatyzowania integracji post–processingu danych z mobilnego pomiaru GNSS z systemami INS i IMU,
- zwiększenia dokładności grafu torów kolejowych jako układu referencyjnego dla systemów kolejowych i ich konwersji na układy współrzędnych przestrzennych.

Etap nr 7: Opracowanie systemu informatycznego wspomagającego analizę wyników pomiarów polowych

Zaproponowane w poprzednich etapach sposoby określenia współrzędnych osi toru i trajektorii pojazdu wymagają specjalistycznych narzędzi do wizualizacji i analiz otrzymanych wyników. W tym celu zaproponowany zostanie prototyp oprogramowania, umożliwiający:

- post–processingowe obliczanie współrzędnych odbiorników GNSS znajdujących się na platformie pomiarowej,

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

- obliczanie dyskretnych reprezentacji osi toru na podstawie pomiarów GNSS/INS,
- graficzną prezentację punktów osi toru na mapie,
- wizualizację trajektorii przejazdu pojazdów na mapie (na podstawie plików wynikowych z pozycjonowania RTK),
- transformację współrzędnych pomiędzy układem globalnym PUWG2000 a lokalnym układem współrzędnych stosowanym przez PKP PLK S.A.,
- wprowadzanie współrzędnych znaków kilometrowych i hektometrowych, wraz z ich wizualizacją na mapie,
- wyznaczanie najbliższych znaków kilometrowych i hektometrowych, występujących pomiędzy zadanymi punktami osi toru (system identyfikacji miejsca wypadku).

Opracowany program będzie posiadał interfejs umożliwiający poruszanie się po bazie danych i modułach obliczeniowych oraz pozwalający na przeglądanie otrzymanych wyników na opracowaniach mapowych.

Etapy nr 8 i 9: Opracowanie dokumentacji sprawozdawczej, określenie sposobu wdrożenia efektów projektu.
Prace w ramach etapu ósmego oraz dziewiątego polegać będą na wykonaniu pełnej dokumentacji rezultatów uzyskanych jako rezultat prac przeprowadzonych we wcześniejszych etapach. W tym celu konieczne będą liczne spotkania konsultacyjne aby sformułować poprawne wnioski końcowe. Zakończone zostaną również prace administracyjne prowadzone przez zespół zarządzający projektem. Określone zostaną kierunki wdrożenia wykonanych prac na drodze uzgodnień z PKP PLK S.A. Jako efekt końcowy przygotowany będzie zbiorczy raport zawierający kompletną dokumentację przeprowadzonych badań teoretycznych i prac terenowych wraz z prototypem systemu informatycznego. Na tym etapie zespół B+R przygotuje ostateczną dokumentację sprawozdawczą z prowadzonych badań.

Badania zrealizowane przez Politechnikę Gdańską

Realizacji projektu InnoSatTrack w roku 2018 przez Politechnikę Gdańską w ramach etapu nr 1 obejmowała kilka zadań szczegółowych, które opisano poniżej.

Analiza metod określania i oceny kształtu toru

W ramach tego zadania przeprowadzono analizę pod kątem merytorycznym szeregu publikacji naukowych oraz obowiązujących przepisów regulujących kwestie określania i oceny kształtu toru w Polsce i za granicą.

Określanie i ocena kształtu toru kolejowego dotyczy, ściślej rzecz biorąc, układu geometrycznego osi toru. Celem tej operacji jest wyznaczenie podstawowych parametrów geometrycznych trasy takich jak:

- położenie i długość odcinków prostych,
- położenie łuków kołowych wraz z określeniem ich promienia i długości,
- położenie krzywych przejściowych wraz z określeniem ich rodzaju i długości.

Na podstawie tych danych realne staje się przeprowadzenie symulacji przejazdu pociągu na danym układzie geometrycznym (a więc ustalenie możliwej do osiągnięcia maksymalnej prędkości jazdy), jak również – co wydaje się sprawą podstawową – uzyskanie danych mających na celu określenie miejsc potencjalnych korekt osi toru i wykonanie projektów potrzebnych do przeprowadzenia jej regulacji.

Pomiar współrzędnych osi toru powinien się odbywać za pomocą anteny satelitarnej ustawionej w osi przekroju poprzecznego toru, przy czym jej górna powierzchnia musi znajdować się na wysokości linii łączącej obydwa toki szynowe w miejscu, dla którego określa się bieżącą szerokość toru. W mobilnych pomiarach satelitarnych takie rozwiązanie jest niemożliwe do zrealizowania, jako że zamocowanie anteny GNSS do konstrukcji wagonu pomiarowego tak by znajdowała się ona na wysokości główek szyn jest niewykonalne. W praktyce antena jest zainstalowana na pewnej ustalonej wysokości względem poziomu wymaganego, wynikającej z gabarytów wagonu, wymiarów układu mocującego antenę do jego podłogi, jak też wymiarów samej anteny. W tej sytuacji pomierzone satelitarnie współrzędne osi toru są obarczone uchybem, który bezwarunkowo powinien zostać wyeliminowany. Stanie się to możliwe, jeżeli w pobliżu anteny zainstalowanej w miejscu gdzie znajduje się czop skrętu wózka zostanie zamocowany inklinometr, którypozwoli na pomiar kątów pochylenia podłużnego i poprzecznego ramy wagonu pomiarowego.

Koncepcja badań trajektorii linii kolejowych z wykorzystaniem nawigacji satelitarnej

Badania trajektorii linii kolejowych z wykorzystaniem nawigacji satelitarnej polegają na przeprowadzeniu mobilnych pomiarów satelitarnych z wykorzystaniem najnowocześniejszej aparatury pomiarowej. Głównym założeniem jest prowadzenie pomiaru z prędkością rzędu 10–30 km/h, co sprawi, że pomiar inwentaryzacyjny będzie względnie szybki [7]. W zakresie tego zadania przeprowadzono szereg analiz, w wyniku których określono założenia odnoszące się do techniki mobilnych pomiarów satelitarnych. Założenia te zostały zweryfikowane przez wykonanie wstępnych badań eksperymentalnych (podczas pomiarów zrealizowanych na sieci tramwajowej w Gdańsku). Należy zaznaczyć, że zespół naukowy ma duże doświadczenia w zastosowaniach zaawansowanych technik pomiarowych na kolei [1, 7].

Opracowano również metody obliczeniowe , pozwalające na wyznaczanie wartości poprawek położenia anteny w profilu podłużnym i w przekroju poprzecznym, by następnie można było dokonywać korekt współrzędnych osi toru. Dysponowanie skorygowanymi współrzędnymi umożliwia zrealizowanie kolejnych etapów w procesie wyznaczania trajektorii pojazdu szynowego (identyfikacji kształtu osi toru) tj.:

- określenie lokalizacji odcinków prostych,
- określenie kątów zwrotu trasy,
- oszacowanie wartości promieni łuków kołowych,
- identyfikację kształtu osi toru na drodze iteracji komputerowej (przy wykorzystaniu algorytmów obliczeniowych opisanych w pracy [7] oraz nowych aplikacji napisanych na potrzeby projektu).

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Wpływ dynamiki ruchu wagonu pomiarowego na pomiary położenia toru z wykorzystaniem mobilnych technik GNSS/INS

Parametry geometryczne toków szynowych (krzywizna, pochylenie, zmienna odległość między tokami, nierówności główek szyny itp.) oraz luzy wynikające z konstrukcji wagonu przekładają się na przemieszczenia ramy wagonu wraz z platformą pomiarową, na której osadzone są anteny satelitarne. Występuje zatem zmiana położenia punktów zamocowania anten względem toków szynowych. Analiza właściwości kinematycznych i kinetycznych wagonu pomiarowego (wózków jezdnych i ramy) jest konieczna do zbadania wpływu przemieszczenia się anten względem toków szynowych podczas mobilnych pomiarów satelitarnych na wynik pomiaru. W ramach projektu problem ten zostanie rozwiązany przy podejściu analitycznym i eksperymentalnym. W zakresie tego zadania przeprowadzono studium metod analitycznych służących formułowaniu równań ruchu dla kolejowego wagonu pomiarowego. Przeprowadzono także analizę możliwości zastosowania komputerowych programów CAD/CAE do potrzeb symulacji dynamicznej wagonu pomiarowego, wykorzystując posiadane w tym zakresie duże doświadczenie, uzyskane w symulacjach dynamicznych różnych obiektów o charakterze kinematycznym stosowanych w trakcji elektrycznej [17].

Dokonano także analizy dotyczącej pomiarów pochylenia wagonu oraz jego drgań podczas pomiarów mobilnych. Zaproponowano komplementarny system pomiarowy, w którego skład wchodzą: inklinometry, akcelerometry oraz opcjonalnie elektroniczne żyroskopy prędkościowe do akwizycji parametrów dynamicznych. Przeprowadzono także studium zastosowania systemów wizyjnych i skanowania laserowego w pomiarach mobilnych w celu analizy przemieszczeń platformy pomiarowej względem toków szynowych. Były one z powodzeniem stosowane w diagnostyce sieci trakcyjnej i odbieraków prądu [1, 10].

Projekt platformy pomiarowej

Platforma pomiarowa jest układem mechanicznym dedykowanym do zamocowania spodarek, na których osadzone są anteny satelitarne. Konstrukcja ta musi być zamocowana do ramy wagonu w sposób pewny, stabilny oraz umożliwiająca względnie szybki montaż i demontaż. Nie jest dopuszczalne jej przemieszczanie się w trakcie wykonywania pomiarów mobilnych. W zakresie omawianego zadania sformułowano wymagania dotyczące oczekiwanych właściwości platformy pomiarowej. Następnie przeprowadzono analizę dostępnych pojazdów szynowych z punktu widzenia ich zastosowania jako pojazdu pomiarowego na potrzeby mobilnych pomiarów satelitarnych. Z analizy tej wynika, że do takich celów może być zastosowany wagon-platforma typu 401Z. Następnie przeprowadzono przegląd wybranych jednostek napędowych. Pozwolił on na wytypowanie drezyny WM-15 jako odpowiedniego pojazdu trakcyjnego do tych potrzeb.

W nawiązaniu do wymienionych działań został opracowany projekt konstrukcji platformy pomiarowej dedykowanej dla wagonu 401Z (rys. **3**). Konstrukcja ta charakteryzuje się skalowalnością ze względu na modułowość jej zasadniczych komponentów i spełnia wymagania stawiane przez mobilne pomiary satelitarne.

Badania platformy pomiarowej w zakresie wynikającym z etapów nr 1 i 2

Prototyp zaproponowanej konstrukcji platformy pomiarowej został wykonany w wersji przeznaczonej do jednego z typów wózków tramwajowych i eksperymentalnie sprawdzony w warunkach terenowych – na rzeczywistym torze tramwajowym podczas mobilnych pomiarów testowych. Na rysunku **4** pokazano widok zespołu pomiarowego podczas mobilnych pomiarów w torze tramwajowym. Testy terenowe potwierdziły słuszność przyjętej koncepcji platformy pomiarowej jako mechanicznego układu o konstrukcji poprzecznicy względem ramy wagonu oraz jako układu modułowego pozwalającego na uzyskanie efektu skalowalności.

Badania zrealizowane przez Uniwersytet Morski w Gdyni

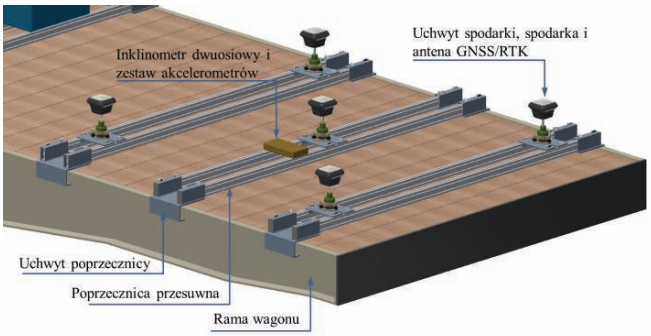
Zespół naukowy Uniwersytetu Morskiego w Gdyni realizował poszczególne zadania badawcze poprzez wykonanie szeregu zadań szczegółowych. Syntetyczny opis prac badawczych, przeprowadzonych w 2018 roku, zaprezentowano poniżej.

Technologie GNSS/INS/MLS w pomiarach ukształtowania toru

Zakres działań podjętych w ramach pierwszego zadania naukowego dotyczył analiz geodezyjnych metod wyznaczania ukształtowania geometrycznego osi toru, obecnie stosowanych przez PKP PLK S.A., wraz z określeniem ich dokładności. Prace terenowe w tego typu zagadnieniach inżynierskich przebiegają na ogół z zastosowaniem klasycznych metod pomiarowych, opartych na tachimetrii. Ze względu na to, że inwentaryzacja geodezyjna torowisk dotyczy przeważnie rozległych obszarów (np. linie kolejowe charakteryzujące się kilkunasto-, bądź kilkuset kilometrową długością), to realizacja takich prac wymaga udziału znacznej liczby pracowników oraz dysponowania dużą ilością aparatury pomiarowej. Konsekwencją tego jest długi czas wykonania prac geodezyjnych, ponadto wymagający znaczących nakładów finansowych. Z tego powodu zakres analiz został rozszerzony o innowacyjne metody, gwarantujące określenie geometrycznego ukształtowania osi toru na drodze pomiarów mobilnych.

Metody pomiarowe wykorzystujące mobilne platformy pomiarowe (MPP) należą do najnowszych i najistotniejszych rozwiązań światowych w szeroko rozumianej inżynierii kolejowej. Należy zaznaczyć, że istotny wkład w rozwój i propagowanie tego typu rozwiązań, mają polscy naukowcy, aktywnie zaangażowani w realizację niniejszego projektu badawczego [12, 13]. Przeprowadzenie mobilnych pomiarów w inżynierii kolejowej odbywa się z zastosowaniem technologii pozycjonowania satelitarnego GNSS, która między innymi, z uwagi na konieczność podtrzymania ciągłości wyznaczania pozycji w przypadku utraty sygnału GNSS, jest na ogół wspierana technologią nawigacji inercyjnej (INS). Integracja pomiarów GNSS oraz INS jest możliwa poprzez zastosowanie specjalistycznych procedur obliczeniowych, znanych m.in. z geo-

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



***3**. Komputerowy model 3D platformy pomiarowej jako modułowej konstrukcji zainstalowanej na ramie wagonu 401Z*

***4**. Zestaw badawczy podczas testów mobilnych w rzeczywistym torze*

dezyjnego rachunku wyrównawczego, tj. filtru Kalmana, a także jego odpornej wersji. Dodatkowo, architektura systemu pomiarowego jest często uzupełniana skanerem laserowym (MLS – *Multiwave Locked System*). Przykład tak wyposażonej MPP zaprezentowano na rysunku **5**.

Należy jednak zaznaczyć, że poziom dokładności wyników pomiaru MLS uzależniony jest od stopnia precyzji wyznaczania pozycji GNSS. Analogiczna sytuacja ma miejsce przy predykcji położenia odbiorników GNSS na podstawie informacji o charakterze kinematycznym. Z tego powodu, kolejne badania naukowe, realizowane w 2018 roku w ramach etapu nr 2, dotyczyły problematyki zwiększenia dokładności wyznaczania pozycji na podstawie mobilnych pomiarów GNSS.

Projekt i wykonanie mobilnej platformy pomiarowej

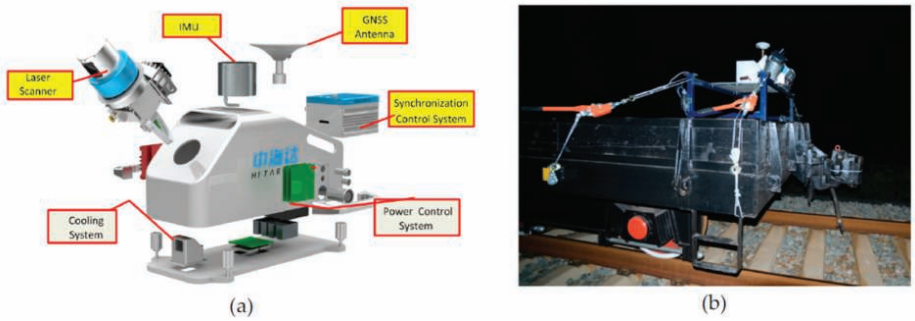
Prace prowadzone w ramach zadania drugiego dotyczyły opracowania ideowego schematu mobilnej platformy pomiarowej (MPP). Analizy przeprowadzone w ramach pierwszego zadania naukowego wykazały, że dotychczasowe podejście do kwestii wyznaczania wskaźników geometrycznego ukształtowania toru z zastosowaniem mobilnych platform pomiarowych bazowało zasadniczo na zastosowaniu jednego tylko odbiornika GNSS. Naukowcy z Uniwersytetu Morskiego w Gdyni zaproponowali uzupełnienie architektury systemu pomiarowego o dodatkowe odbiorniki GNSS. Opracowany schemat ideowy rozmieszczenia dodatkowych odbiorników GNSS został zaprezentowany na rysunku **6**.

Przyjęto, że docelowo na powierzchni MPP znajdować się będzie do pięciu odbiorników GNSS. Na podstawie pomiarów przeprowadzonych z wykorzystaniem tych odbiorników, obliczane będą ostateczne współrzędne platformy pomiarowej. Odbywać się to będzie poprzez wyznaczane średniej arytmetycznej pozycji wszystkich odbiorników, bądź na podstawie innych warunków geometrycznych dotyczących zaprojektowanej konstrukcji pomiarowej. Na rysunku **7** zaprezentowano wybrane możliwe warianty rozmieszczenia odbiorników GNSS w procesie wyznaczania osi toru.

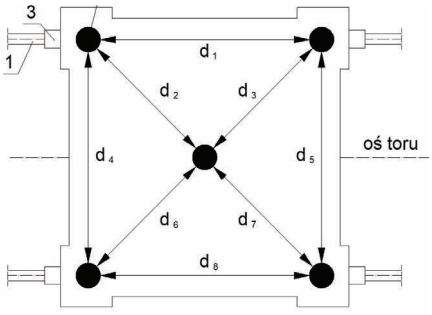
Idee rozwiązania zaproponowane na tym etapie prac badawczych dotyczą zarówno kwestii pozycjonowania w czasie rzeczywistym, jak też opracowania „surowych" danych pomiarowych w trybie post–processingu. Należy jednak zaznaczyć, że prace te są również szczególnie istotne w kontekście realizacji trzeciego zadania badawczego, w ramach którego prowadzone są analizy mające na celu zwiększenie dokładności pozycjonowania GNSS w warunkach pomiarów mobilnych, w tym także dotyczące optymalizacji liczby odbiorników GNSS biorących udział w pomiarze oraz doboru odpowiedniej aparatury pomiarowej.

Możliwości poprawy dokładności stosowanego obecnie w PKP sposobu określania położenia pociągów

W ramach prac nad trzecim zadaniem naukowym przeprowadzono analizy teoretyczne dotyczące zwiększenia dokładności pozycjonowania GNSS w warunkach pomiarów mobilnych. Wykonano również pomiary wstępne, na prototypie platformy pomiarowej opracowanej przez zespół naukowy PG, których głównym celem był dobór odpowiedniej aparatury pomiarowej oraz optymalizacja liczby odbiorników GNSS na potrzeby pomiaru ukształtowania toru. Pomiary te zostały przeprowadzone z zastosowaniem odbiorników GNSS udostępnionych przez firmy Leica i Trimble. Testy odbiorników dotyczyły zarówno pozycjonowania w czasie rzeczywistym (RTK), jak i przetwarzania danych pochodzących z obserwacji satelitarnych w trybie post–processingu. Na potrzeby omawianych badań została zaprojektowana i opracowana konstrukcja pomiarowa, w skład której wchodzą dwie mobilne platformy pomiarowe, na których zostały zainstalowane odbior-

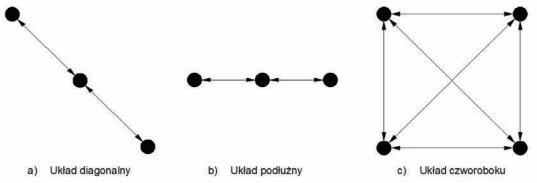


***5**. Przykładowa architektura pomiarowa GNSS/INS/MLS, wykorzystana w badaniach opisanych w pracy [19]: a) widok urządzenia; b) platforma pomiarowa*

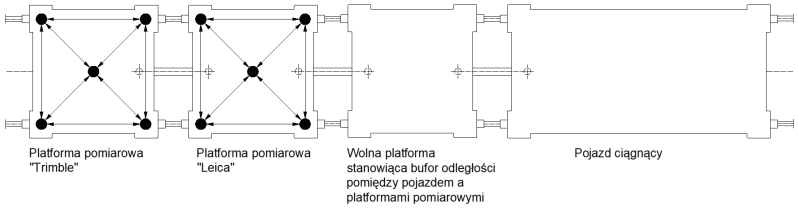


***6**. Schemat ideowy mobilnej platformy pomiarowej: 1 – toki szynowe, 2 – punkty wymuszonego centrowania odbiornika GNSS, 3 – koła platformy, d_i – odległości pomiędzy punktami centrowania odbiorników GNSS*

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



7. Wybrane warianty rozmieszczenia odbiorników GNSS względem osi podłużnej platformy w procesie wyznaczania osi toru



8. Schemat ideowy konstrukcji pomiarowej wykorzystywanej w pomiarach wstępnych

niki wyżej wymienionych firm. Ideowy schemat konstrukcji pomiarowej przedstawiono na rysunku **8**.

Prace pomiarowe zostały poprzedzone analizami teoretycznymi, dotyczącymi – między innymi – geodezyjnych sieci GNSS w Polsce oraz standardu transmisji danych geodezyjnych i nawigacyjnych. Prace te są szczególnie istotne z uwagi na to, że każda sieć GNSS charakteryzuje się inną liczbą stacji referencyjnych, w których w sposób permanentny prowadzone są obserwacje GNSS. Inne różnice dotyczące stacji referencyjnych mogą dotyczyć zainstalowanej na nich aparatury pomiarowej, rodzaju odbieranych sygnałów GNSS oraz wersji korekt udostępnianych w czasie rzeczywistym, a w konsekwencji dokładności pozycjonowania. W pomiarach wstępnych zastosowano w sumie dziesięć odbiorników: pięć odbiorników GS18T firmy Leica oraz pięć odbiorników R10 firmy Trimble, które – wykorzystując sieć stacji referencyjnych SmartNET (Leica) oraz VRSNet (Trimble) – umożliwiały rejestrację danych pozycyjnych o wysokiej dokładności w czasie rzeczywistym przy częstotliwości 1 Hz. Mapy stacji referencyjnych tych sieci zostały zaprezentowane na rysunku **9**.

Część teoretyczna analiz została uzupełniona o charakterystyki innych sieci stacji referencyjnych działających na obszarze Polski, tj. TPI NETpro oraz ASG-EUPOS. W ramach pomiarów wstępnych zarejestrowano również dane obserwacyjne bez korekt pochodzących ze stacji referencyjnych przy częstotliwości 20 Hz.

Podsumowanie

Omówione w artykule założenia innowacyjnego systemu wyznaczania położenia toru kolejowego na podstawie pomiarów mobilnych opartych o lokalizację satelitarną wskazują na złożoność rozwiązywanego problemu. Analiza zastosowania najnowszych technik pomiarowych podbudowanych wieloetapową obróbką komputerową danych zarówno w trakcie pomiaru jak i w ramach tzw. post–processingu, pozwalają na sformułowanie tezy, że jest możliwe określanie położenia toru kolejowego na podstawie pomiarów mobilnych z zachowaniem poziomu dokładności charakterystycznego dla tachimetrycznych metod stacjonarnych. Przeprowadzone pierwsze próby terenowe wykazują na słuszność przyjętej koncepcji pomiarowej i wstępnie potwierdzają sformułowaną tezę. W ramach dalszych prac planowane jest wykonanie platformy pomiarowej na potrzeby realizacji pomiarów na liniach kolejowych. Wykonanie tych pomiarów i potwierdzenie uzyskiwanych wyników przez porównanie ze stosowanymi obecnie metodami pomiarowymi pozwoli na ostateczne potwierdzenie tezy i przygotowanie systemu do wdrożenia komercyjnego. ◀

Materiały źródłowe

[1] Bartłomiejczyk M., Jarzębowicz L., Judek S., Karkosińska-Brzozowska N., Karwowski K., Mizan M., Skibicki J., Wilk A.: Energetyka transportu zelektryfikowanego. Poradnik inżyniera. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2018.

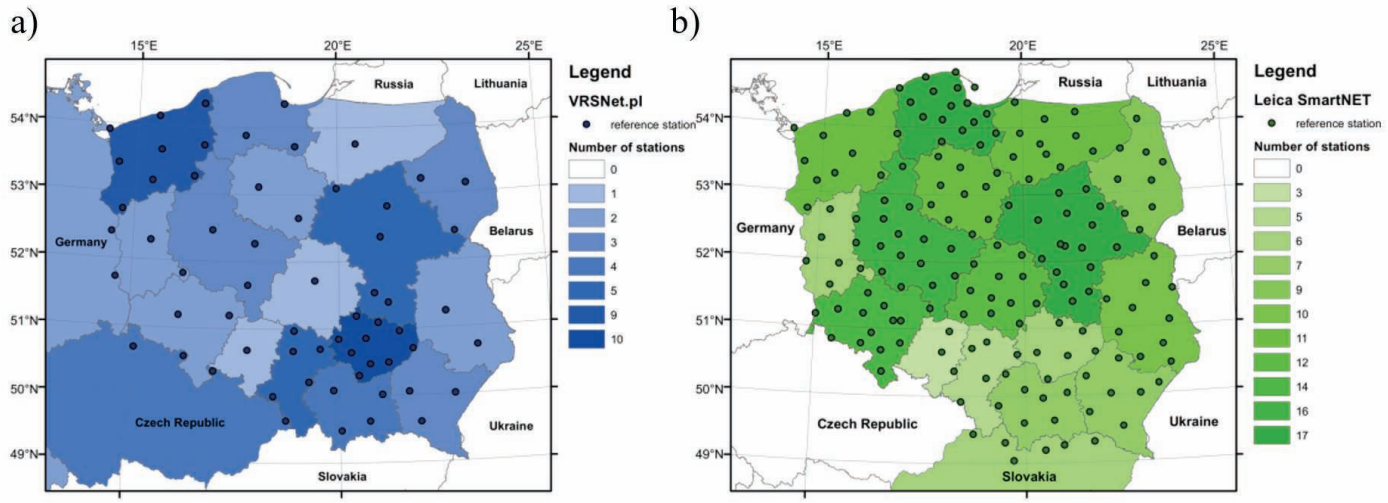
[2] Gucma M., Montewka J.: Podstawy morskiej nawigacji inercyjnej. Wydawnictwo Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin 2006.

[3] Koc W., Specht C.: Wyniki pomiarów satelitarnych toru kolejowego. Technika Transportu Szynowego 2009, tom 15, nr 7-8, s. 58-64.

[4] 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, pp. 303-320.

[5] Koc W., Specht C.: Zastosowanie mobilnych pomiarów satelitarnych w projektowaniu i eksploatacji dróg szynowych. Problemy Kolejnictwa 2015, tom 59, z. 166, s. 63-83.

[6] Koc W., Specht C., Chrostowski P.: Finding deformation of the straight rail track by GNSS measurements. Annual of Navigation 2012, No. 19, part 1,



9. Mapy stacji referencyjnych: a) sieci VRSNet (Trimble); b) sieci SmartNet (Leica)

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

pp. 91-104.
[7] Koc W., Specht C., Chrostowski P.: Projektowanie i eksploatacja dróg szynowych z wykorzystaniem mobilnych pomiarów satelitarnych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2018.
[8] Liu C., Li N., Wu H., Meng X.: Detection of high-speed railway subsidence and geometry irregularity using terrestrial laser scanning. Journal of Surveying Engineering 2014, Vol. 140, Iss. 3.
[9] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 15 października 2012 r. w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych. Dz. U. R. P. z 2012 r., Poz. 1247.
[10] Skibicki J.: Wizyjne metody pomiarowe w diagnostyce górnej sieci trakcyjnej. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2018.
[11] Specht C.: System GPS. Wydawnictwo Bernardinum, Pelplin 2007.
[12] 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, rocznik LXXI, nr 5, s. 9-16.
[13] Specht C., Koc W.: Mobile satellite measurements in designing and exploitation of rail roads. Transportation Research Procedia 2016, Vol. 14, pp. 625-634.
[14] Specht C., Koc W., Chrostowski P., Szmagliński J.: The analysis of tram tracks geometric layout based on mobile satellite measurements. Urban Rail Transit 2017, Vol. 3, Iss. 4, pp. 214-226.
[15] Specht C., Koc W., Smolarek L., Grządziela A., Szmagliński J., Specht M.: Diagnostics of the tram track shape with the use of the global positioning satellite systems (GPS/Glonass) measurements with a 20 Hz frequency sampling. Journal of Vibroengineering 2014, Vol. 16, Iss. 6, pp. 3076-3085.
[16] 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 2011, London, UK, pp. 77-81.
[17] Wilk A.: Novel analysis methods of dynamic properties for vehicle pantographs. MATEC Web of Conferences 2018, Vol. 180, 01005, pp. 1-6.
[18] Zakres tematyczny konkursu 1/4.1.1/2017/POIR realizowanego w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia pn.: „Badania i Rozwój w Infrastrukturze Kolejowej – BRIK". Załącznik nr 1 do Regulaminu Konkursu, Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, Warszawa 2017. Źródło dostępu (19.02.2019): https://www.ncbr.gov.pl/programy/fundusze-europejskie/poir/konkursy/konkurs14112017-brik/
[19] Zhou Y., Wang S., Mei X., Yin W., Lin C., Hu Q., Mao Q.: Railway tunnel clearance inspection method based on 3D point cloud from Mobile Laser Scanning. Sensors 2017, Vol. 17, Iss. 9, 2055, pp. 1-20.

REKLAMA

GM ROADS

CZAS NA INNOWACYJNE
BUDOWNICTWO

Oferujemy **profesjonalne usługi** z zakresu:

- budowy infrastruktury komunikacyjnej, sieci instalacyjnych i obiektów hydrotechnicznych,
- wykonywania pomiarów geodezyjnych, tworzenia map do celów projektowych, wytyczenia budynku i sieci.

W BUDOWNICTWIE WYBIERZ FIRMĘ,
KTÓREJ MOŻESZ ZAUFAĆ

Zobacz, co już wybudowaliśmy
i dla kogo pracowaliśmy:
www.gm-roads.pl

Biuro:
ul. Krzemieniecka 47,
54-613 Wrocław

Budownictwo inżynieryjne:
tel.: (71) 300 12 40
e-mail: info@gm-roads.pl

Geodezja:
tel.: 697 660 932
e-mail: m.wozniak@gm-roads.com

Siedziba firmy:
ul. Wrocławska 41, Łażany
58-130 Żarów

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl