

ZASTOSOWANIE SKANINGU LASEROWEGO W INWENTARYZACJI NAWIERZCHNI STALOWEJ TUNELU TRAMWAJU SZYBKIEGO

Przemysław Grabias

mgr inż. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel.: +48 12 617 5165, e-mail: pgrabias@agh.edu.pl

***Streszczenie.** Przewieziona w artykule tematyka związana jest z zastosowaniem techniki skaningu laserowego w inwentaryzacji nawierzchni stalowej torowisk tramwajowych. Na potrzeby artykułu wykonany został projekt regulacji osi toru oraz analiza jego geometrii. Wykorzystany do badań odcinek toru znajduje się w tunelu tramwajowym. Obiekt ten jest pierwszą i jednocześnie najdłuższą tego typu budowlą w Polsce. Stanowi on istotny fragment trasy Krakowskiego Szybkiego Tramwaju (KST). Dzięki temu możliwe było rozszerzenie opracowania na kilka dodatkowych zagadnień, obejmujących między innymi tunele i nowoczesne rozwiązania w zakresie miejskiej komunikacji szynowej.*

Słowa kluczowe: skaningu laserowy, nawierzchnia stalowa, torowisko tramwajowe, projekt regulacji osi toru

1. Wprowadzenie

Rosnące na przestrzeni ostatnich lat potrzeby transportowe w komunikacji miejskiej oraz intensywny postęp motoryzacji generują wymóg modernizacji istniejącej sieci transportu publicznego. Uniwersalne postulaty, jakie powinny spełniać systemy komunikacji zbiorowej to m.in.: bezpieczeństwo i komfort podróży, wysoka prędkość komunikacyjna, niezawodność i regularność ruchu pojazdów oraz możliwie niskie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne [6]. W największym stopniu postulaty te spełnia transport szynowy. Fakt ten sprawia, że miasta coraz częściej decydują się na inwestycje w jego zakresie. Istniejące sieci są w różnym stopniu rozbudowywane, modernizowane i unowocześniane. W Olsztynie reaktywowano system komunikacji tramwajowej i zbudowano nowe linie. Do niedawna planowano budowę systemu tramwajowego w Jaworznie, jednak została ona zaniechana z powodów finansowych.

Coraz większą popularność zyskują także nowoczesne rozwiązania w zakresie miejskiej komunikacji szynowej: tramwaj szybki, premetro oraz metro. Różnią się one od siebie osiąganą prędkością komunikacyjną, wymaganymi nakładami finansowymi, stopniem zawansowania technicznego, sposobem realizacji, lokalizacją sieci oraz kolizyjnością z innymi środkami komunikacji. Z wymienionych

czynników na szczególną uwagę zasługuje prędkość komunikacyjna, będąca stosunkiem przebytej drogi do czasu pracy pojazdu, z uwzględnieniem czasów postoju na przystankach pośrednich. Zwiększenie prędkości może odbywać się w dwojaki sposób: poprzez dostosowanie torowiska do osiągania wyższych prędkości lub projektowanie przystanków i taboru w taki sposób, by ograniczyć czas postoju.

W przypadku dużych miast, w których potrzeby komunikacyjne nie uzasadniają merytorycznie budowy metra, rozsądny kompromis może stanowić system szybkiego tramwaju. Jak sama nazwa wskazuje, zasadniczą zaletą tramwaju szybkiego jest zwiększenie prędkości eksploatacyjnej przy pełnej możliwości integracji z istniejącą siecią klasycznego tramwaju. Na trasach szybkiego tramwaju umożliwiają to rozmaite budowle inżynierskie, m.in. estakady i tunele komunikacyjne. Przenosząc ruch nad lub pod powierzchnię terenu pozwalają na bezkolizyjne prowadzenie skrzyżowań.

Tory tramwajowe, zarówno w przypadku tramwaju klasycznego, jak i szybkiego, wymagają prowadzenia pomiarów kontrolnych o określonej dokładności. Potrzeba utrzymania funkcjonalności i bezpieczeństwa ruchu tramwajowego wymaga wykonywania badań diagnostycznych geometrii toru, obejmujących pomiar podstawowych parametrów określających położenie toków szynowych. Prowadzone są także modernizacje linii, których istotną częścią jest opracowywanie projektu regulacji osi toru. Badania mogą być z powodzeniem prowadzone z wykorzystaniem nieznacznie zmodyfikowanych metod stosowanych powszechnie na drogach kolejowych. Diagnostyka nawierzchni torów tramwajowych wykorzystuje różne metody pomiaru mającego na celu określenie ich stanu technicznego. Obejmują one m.in. zastosowanie technik klasycznych z wykorzystaniem instrumentów i przyrządów geodezyjnych, a także różnego rodzaju pojazdów pomiarowych.

2. Obiekt pomiarowy – tunel Krakowskiego Szybkiego Tramwaju

Na początku lat dziewięćdziesiątych, w wyniku rozważań nad przyszłością transportu szynowego w Krakowie, utworzono koncepcję Krakowskiego Szybkiego Tramwaju (KST). Budowa tego systemu została podzielona na kilka etapów przeznaczonych do sukcesywnej realizacji i wiązała się jednocześnie z rezygnacją z dawnych planów budowy metra.

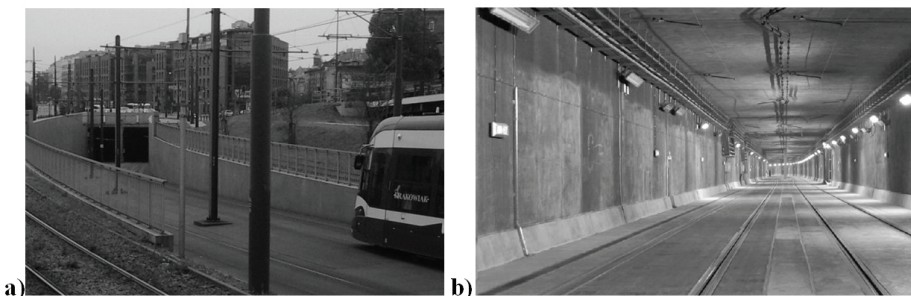
Pierwszym oddanym do użytku fragmentem KST był odcinek między osiedlem Kurdwanów a ul. Wielicką. Jego kluczowym elementem jest pętla na estakadzie tramwajowej przy ul. Hałaszkki, stanowiąca przykład wykonanego w sposób nowoczesny obiektu inżynierskiego w zakresie infrastruktury tramwaju szybkiego. Kolejnym powstałym odcinkiem jest linia z os. Krowodrza Górka do Ronda Grzegórzeckiego wraz tunelem tramwajowym. Zmodernizowano także pętlę przy ul. Kamiennej. Budowie tego odcinka towarzyszył szereg inwestycji na obszarze tzw. Krakowskiego Centrum Komunikacyjnego, obejmujący

przebudowę układu torowisk tramwajowych w rejonie ul. Pawiej, Regionalnego Dworca Autobusowego w Krakowie i podziemnej hali Dworca Kolejowego Kraków Główny [12]. W 2010 r. ukończono odcinek między Rondem Grzegórzeckim a Małym Płaszowem z estakadą w ciągu ul. Nowohuckiej. Natomiast w sierpniu 2015 r. otwarta została estakada nad dworcem kolejowym Kraków Płaszów, która umożliwi ruch tramwajów, rowerów i pieszych. Jest ona kluczowym połączeniem między wymienionymi wcześniej trasami KST i umożliwiła ona utworzenie korytarzowego połączenia z północy na południe Krakowa.

Pomiary na potrzeby artykułu wykonano w tunelu Krakowskiego Szybkiego Tramwaju, będącym jednym z najistotniejszych węzłów komunikacyjnych miasta. Łączy on okolice ul. Pawiej, Dworca Towarowego i kampusu Politechniki Krakowskiej z Rondem Mogiłskim. Przebiega pod ul. Lubomirskiego, Dworcem Głównym PKP i Galerią Krakowską.

Prace związane z realizacją tunelu były prowadzone od lat siedemdziesiątych i zostały oficjalnie ukończone w 2008 r. Był on pierwszym tunelem tramwajowym w kraju, a jego długość (1420 m) czyni go także najdłuższym. Tunel można sklasyfikować według różnych kryteriów, jako tramwajowy (zaliczający się do tuneli drogowych), płytki, wykonany metodą odkrywkową, o przekroju prostokątnym, częściowo jednokomorowy, częściowo dwukomorowy, monolityczny żelbetowy (z pewnymi wyjątkami) oraz szlakowy dwutorowy.

Charakterystycznymi elementami tunelu są dwa portale wjazdowe, rampa dojazdowa przy portalu północnym o długości 118 m (rys. 1a) oraz dwa przystanki podziemne: Dworzec Główny Tunel i Politechnika. W tunelu kursują trzy linie tramwajowe: dwie tramwaju klasycznego (5,19) oraz jedna tramwaju szybkiego (50). Torowisko w tunelu zostało wykonane w technologii tzw. szyny pływającej z wykorzystaniem szyn Ri 60N [10], która została zaprezentowana na rys. 2.



Rys. 1. Wjazd do tunelu od strony północnej (a) oraz wnętrze tunelu (b)

Źródło: a) własne, b) [12]

Informacje o odległości oraz kątach poziomych i pionowych umożliwiają obliczenie współrzędnych poszczególnych punktów obiektu. Gęstość pokrycia obiektu determinowana jest poprzez rozdzielczość skanowania, którą należy dopasować do potrzeb i ustawić przed rozpoczęciem pomiaru. Wynikiem pomiaru skanerem laserowym na pojedynczym stanowisku jest tzw. chmura punktów. Każdy z punktów w chmurze posiada współrzędne przestrzenne w układzie lokalnym o początku w centrum skanera, a także intensywność odbicia, która może być wykorzystywana do późniejszej wizualizacji. Istnieje możliwość transformacji układu lokalnego do dowolnego układu współrzędnych.

Prowadzenie pomiaru na wielu stanowiskach stwarza potrzebę połączenia chmur w procesie rejestracji. Zazwyczaj odbywa się on w oparciu o odpowiednio rozmieszczoną w czasie pomiaru osnowę fotogrametryczną w postaci różnego rodzaju tarcz celowniczych (rys. 3.), które objęte są pomiarem skaningowym i tachymetrycznym. Podstawowym warunkiem do połączenia ze sobą dwóch chmur jest posiadanie co najmniej trzech punktów wspólnych na obu zobrazowaniach. Większa liczba wspólnych szczegółów ułatwia łączenie obserwacji i zwiększa jego dokładność [15]. Wynikiem procesu rejestracji chmur punktów jest trójwymiarowe, kompleksowe zobrazowanie obiektu. Dokładny model 3D obiektu może zostać wykorzystany do różnorodnych analiz dotyczących tunelu kolejowego [5], innych rodzajów tuneli [7,11,18], a także skrajni budowli [1].

Zasadniczą zaletą techniki skaningu laserowego jest możliwość otrzymania szczegółowych i precyzyjnych danych przestrzennych do różnorodnych analiz w stosunkowo krótkim czasie. W opracowywanym przypadku (tunel tramwajowy) pozwala to na pozyskanie informacji zarówno o nawierzchni stalowej, jak i infrastrukturze towarzyszącej.

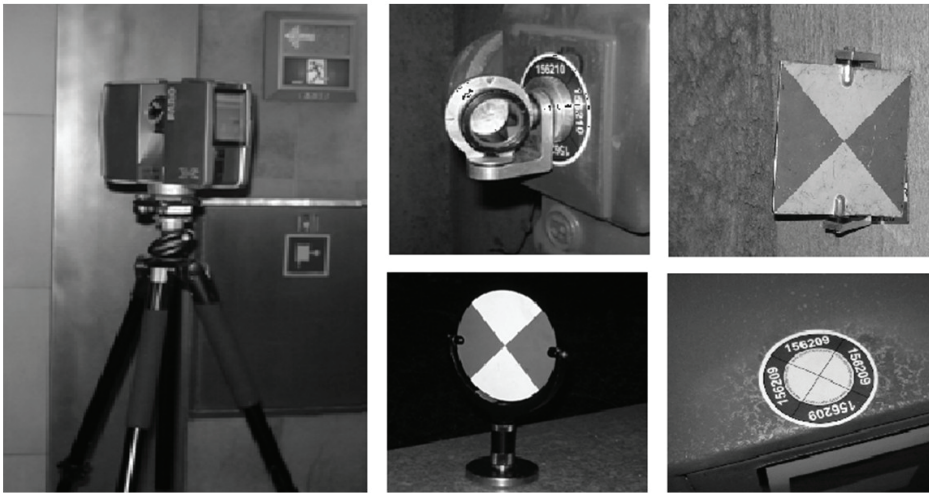
3.2 Pomiar terenowy

Pomiary na potrzeby artykułu odbyły się w tunelu Krakowskiego Szybkiego Tramwaju pod Dworcem Głównym PKP w porozumieniu z zarządcą obiektu (Zarządem Infrastruktury Komunalnej i Transportu w Krakowie). Realizowane były przez 3 dni w godzinach wstrzymania ruchu tramwajowego (0:00 – 4:00). Pomiarom objęty został cały obiekt, włącznie z portalem południowym, północnym z rampą dojazdową oraz dwoma przystankami podziemnymi.

Główną część prac stanowił pomiar techniką naziemnego, stacjonarnego skaningu laserowego na kolejnych parach stanowisk zlokalizowanych wzdłuż osi podłużnej tunelu, znajdujących się w odległości około 20 metrów od siebie. Wykorzystano do niego dwa skanery fazowe Faro Focus 3D wraz z zestawem tarcz celowniczych, ustawione w czasie pomiaru na solidnych statywach fotograficznych. Stanowiska lokalizowano w taki sposób, by objąć pomiarem jak najwięcej elementów tunelu. Łącznie w wyniku prac otrzymano 184 chmury punktów, a czas pomiaru na pojedynczym stanowisku wynosił średnio 10 minut.

Osnowę fotogrametryczną, pozwalającą na późniejsze połączenie chmur stanowiły płaskie oraz obrotowo-uchylne tarcze celownicze z rewersem magnetycznym,

zamontowane na elementach metalowych tunelu. Integrację pomiarów skaningowych i tachymetrycznych umożliwiło zastosowanie płytek metalowych i specjalnych naklejek. Takie rozwiązanie pozwoliło na zamontowanie i scentrowanie na punktach zamiennie tarcz celowniczych (fotopunktów) i reflektorów pryzmatycznych, stanowiących osnowę pomiarową. Pomiar tachymetryczny osnowy został wykonany instrumentem Leica TCR 1203+. Ciąg poligonowy, założony na jego potrzeby nawiązany został na obu końcach tunelu do par punktów o współrzędnych określonych w układzie państwowym. Współrzędne te zostały otrzymane w wyniku pomiaru statycznego GNSS wykonanego w pojedynczej, dwugodzinnej sesji z wykorzystaniem czterech odbiorników JAVAD.



Rys. 3. Skaner fazowy Faro Focus 3D wraz z akcesoriami
 Źródło: opracowanie własne

4. Opracowanie danych pomiarowych

Opracowanie danych pozyskanych w ramach prac terenowych rozpoczęto od przeprowadzenia wyrównania obserwacji statycznych GNSS w procesie post-processingu w nawiązaniu do krajowej sieci ASG-EUPOS (stacja permanentna KRA1). Następnie wykonano wyrównanie obserwacji tachymetrycznych, na które składało się wyrównanie sieci płaskiej i wysokościowej. Średni błąd kąta poziomego wyniósł 10 cc, natomiast średni błąd odległości 2 mm. Maksymalny błąd położenia punktu osnowy przyjął wartość 5 mm zarówno w przypadku położenia sytuacyjnego, jak i wysokościowego.

Proces połączenia i orientacji przestrzennej chmur punktów wykonany został w oparciu o pomierzone tarcze celownicze i wyniki wyrównania pomiarów tachymetrycznych. Wzajemne połączenia między chmurami zostały skontrolowane pod kątem spełnienia założonego warunku dokładności. Maksymalny błąd położenia fotopunktu przyjął wartość 5 mm.

Błąd wyznaczenia elementów infrastruktury (szczegółów obiektu) został określony na podstawie raportu wygenerowanego dla przeprowadzonego procesu rejestracji. Wyniósł on 6 mm w stosunku do położenia punktów osnowy geodezyjnej. Całkowity czas potrzeby do połączenia wszystkich chmur punktów wyniósł około 50 godzin.

Czynności pomiarowe na potrzeby opracowania projektu regulacji osi toru oraz ogólne warunki jego wykonania opisuje standard techniczny GK-1 [13].

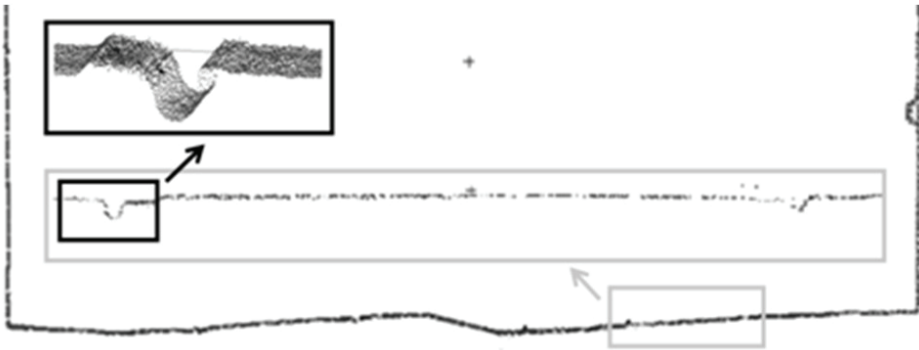
Po dokonaniu rejestracji obiektowy wynikowy (zbiór punktów o przestrzennych współrzędnych wyznaczonych w układzie państwowym) można dowolnie przetwarzać i opracowywać w środowisku tzw. przestrzeni modelowej. Posiadanie kompletnego modelu 3D stwarza możliwość przeprowadzenia dodatkowych analiz m.in. na badanie skrajni budowli oraz sieci trakcyjnej. Bazując na otrzymanym zobrazowaniu można wykonywać również badania elementów konstrukcyjnych tunelu, a także weryfikować położenie peronów przystanków podziemnych. Podstawową operacją na chmurze punktów na potrzeby większości analiz jest wykonanie przekrojów poprzecznych tunelu. Podczas ich generowania warto zwrócić szczególną uwagę na dwa parametry: odległość między kolejnymi przekrojami oraz grubość przekroju. Wartości tych parametrów powinny być starannie dopasowane do kształtu i charakterystyki badanego obiektu.

Do szczegółowych badań wybrano odcinek toru A tunelu, położony przy wjeździe do tunelu od strony południowej. Znajduje się w przedziale kilometrażu od 0+917 do 1+280 i ma długość 363 m. Geometra wybranego odcinka obejmuje łuk kołowy o kierunku lewym, dwie symetryczne krzywe przejściowe oraz proste dojazdowe. Na niewielkiej części badanego obszaru wystąpiła strefa o niskiej gęstości chmury punktów. Z powodu występujących przesłonek nie udało się pozyskać kilku przekrojów pomiarowych.

Łącznie wygenerowane zostały 93 przekroje poprzeczne przez tunel. Przykładowy przekrój wraz ze zbliżeniem na tok szynowy zamieszczony jest na rys. 4. Można wyróżnić trzy zasadnicze odcinki, na których wykonano przekroje:

- odcinek prostej dojazdowej do tunelu od strony Ronda Mogilskiego (10 przekrojów wykonanych w odległościach 1,5 m od siebie),
- odcinek obejmujący łuk kołowy wraz z symetrycznymi krzywymi przejściowymi (62 przekroje wykonane w odległościach 2 m od siebie),
- odcinek prostej w tunelu (21 przekrojów co 10 m).

Zróżnicowanie odległości pomiędzy kolejnymi przekrojami na różnych odcinkach jest uzasadnione potrzebą zoptymalizowania prac i dostosowania efektów (przekrojów poprzecznych) dla potrzeb dalszego opracowania. Ostatnią czynnością w tym etapie opracowania danych było pozyskanie współrzędnych punktów znajdujących się 14 mm poniżej powierzchni toczonej po wewnętrznej stronie obu toków szynowych toru.



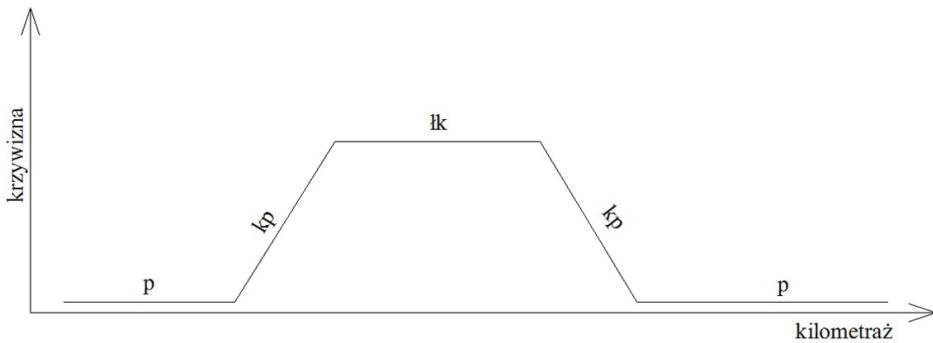
Rys. 4. Przekrój poprzeczny tunelu tramwajowego ze zbliżeniem na tok szynowy
Źródło: opracowanie własne

Wykonanie projektu regulacji, wraz z szeregiem innych, towarzyszących mu prac w ramach modernizacji drogi szynowej przynosi wiele wymiernych korzyści [3,14]:

- poprawę parametrów geometrycznych oraz zwiększenie bezpieczeństwa,
- skrócenie czasu przejazdu i zwiększenie liczby kursujących pojazdów szynowych,
- odciążenie innych środków komunikacji miejskiej,
- utworzenie węzłów przesiadkowych (kolej, tramwaj, autobus, samochody osobowe).

Wyróżnić można dwa podejścia do projektu regulacji osi toru. Może być on realizowany w celu przywrócenia geometrii założonej w projekcie, bądź dopasowania geometrii toru do możliwie najlepszego i najkorzystniejszego układu. Projekt regulacji osi toru na potrzeby artykułu wykonany został w dedykowanym programie do projektowania i optymalizacji infrastruktury transportu szynowego, wykorzystującym do wpasowania wieloelementową analizę regresji. Do wstępnej identyfikacji poszczególnych elementów geometrii toru posłużył wykres krzywizn. Analizując wartości i charakter zmian krzywizn na wykresie można stwierdzić, do jakich elementów geometrii należą poszczególne punkty osi toru [4]. Odcinki o krzywiznie stałej i pokrywające się z osią poziomą wykresy są prostymi (p), odcinki o krzywiznie zmiennej są krzywymi przejściowymi (kp), natomiast odcinki o stałej, pewnej określonej wartości krzywizny to łuki kołowe (łk), co ilustruje (rys. 5.).

Projekt regulacji osi toru w płaszczyźnie poziomej zakładał odtworzenie geometrii badanego odcinka. Przyjęta została stała długość krzywych przejściowych, natomiast zmianie mogły ulec długości prostych oraz długość i promień łuku kołowego. Warto zaznaczyć fakt stosowania klotoidy jako krzywej przejściowej w przypadku torowisk tramwajowych. Zmiany w geometrii toru, będące wynikiem przeprowadzonego procesu zostały zestawione w tab. 1. Skorygowaniu uległy długość łuku kołowego (zwiększona o 1,54 m) oraz promień łuku (zwiększony o 1,41 m). Wzajemnie dopasowane zostały również proste oraz krzywe przejściowe.



Rys. 5. Schematyczny wykres krzywizn

Źródło: opracowanie własne

Tabela 1. Zestawienie wejściowych i wynikowej geometrii toru

	Element toru	Prosta	Krzywa przejściowa	Łuk	Krzywa przejściowa	Prosta
Parametry wejściowe	Długość [m]	22,834	44,956	49,950	44,956	211,854
	Promień [m]			101,950		
Parametry wynikowe	Długość [m]	17,567	44,956	50,104	44,956	205,965
	Promień [m]			102,091		

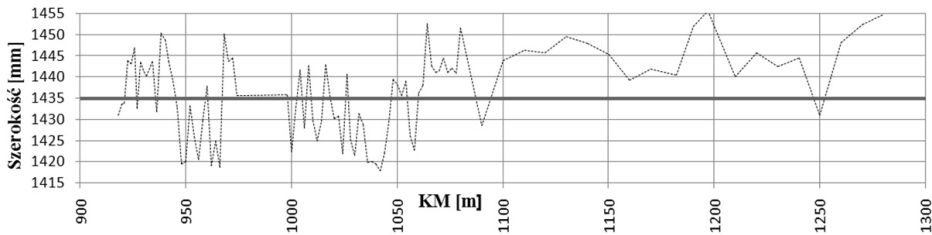
Źródło: opracowanie własne

Na granicach przerwy w pozyskaniu punktów osi toru występują odstające wartości przesunięć osi toru o wartościach do 37 mm. Możliwymi powodami znaczących przesunięć jest niska gęstość punktów w chmurze na tym odcinku oraz reakcja algorytmu obliczeniowego na nieciągłość danych. Dla pozostałych fragmentów osi toru przesunięcia kształtują się w granicach od kilku do kilkunastu milimetrów. Wartości dodatnie przesunięć oznaczają konieczność przesunięcia osi toru w prawo, natomiast wartości ujemne w lewo.

Projekt regulacji w płaszczyźnie pionowej został wykonany w oparciu o dane z dokumentacji technicznej i zakładał minimalizację przesunięć. Niweleta toru określa nachylenie na badanym odcinku na 0,144%. Po dokonaniu weryfikacji położenia toru w profilu podłużnym uzyskano nachylenie równe 0,134% przy maksymalnym podbiciu toru równym 19 mm.

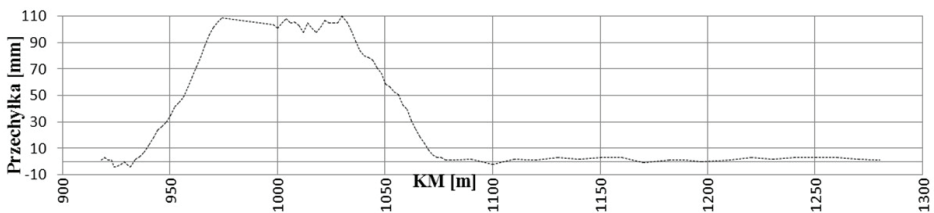
Na podstawie punktów położonych na obu tokach szynowych obliczone zostały parametry szerokości oraz przechyłki toru. Polska Norma [9] wskazuje, by szerokość mierzyć z wykorzystaniem toromierza z podziałką, a w przypadku przechyłki toromierza z poziomicy. W artykule zbadana została możliwość wykorzystania pomiarów skaningowych do analizy szerokości i przechyłki toru. Nominalna szerokość badanego odcinka toru tramwajowego jest równa 1435 mm. Na podstawie załączonego wykresu szerokości (rys. 6.) można stwierdzić, że na prostych wartości prześwitu są większe do nominalnych. Natomiast na łuku i części krzywych przejściowych występują wartości poniżej nominalnej. Może to świadczyć o niewielkich uchybieniach w procesie realizacji torowiska lub problemach w zakresie

stanu technicznego toru. W niektórych fragmentach łuków kołowych w tunelu widoczne było postępujące zużycie boczne szyn. Latem 2015 r. prowadzone były prace związane z remontem nawierzchni stalowej, w czasie których tunel był tymczasowo zamknięty. Ze zmian w wartościach na wykresie przechyłki toru (rys. 7.) można wyraźnie odczytać układ geometryczny badanego odcinka toru i wyodrębnić jego elementy składowe. Przechyłki na prostych mają wartości zbliżone do zera, na krzywych przejściowych mają tendencję rosnącą lub malejącą, a na łuku kołowym są bliskie nominalnej wartości projektowej równej 100 mm. Zaobserwowane różnice przechyłek między wartościami nominalnymi, a wynikowymi są równe maksymalnie 4 mm na prostych i 8 mm na łuku kołowym.



Rys. 6. Wykres otrzymanych szerokości toru

Źródło: opracowanie własne



Rys. 7. Wykres otrzymanej przechyłki toru

Źródło: opracowanie własne

Sprawdzonym w praktyce rozwiązaniem, znanym z dróg kolejowych, jest sieć dedykowanej dla nich osnowy geodezyjnej, której punkty umożliwiają nawiązywanie różnego rodzaju pomiarów. Utworzenie analogicznej sieci punktów, nazwanej roboczo osnową tramwajową przyniosłoby szereg wymiernych korzyści. Zaproponowana osnowa może być stosowana dla wybranych, szczególnie istotnych odcinków m.in. tunele lub linie tramwaju szybkiego. Odpowiednia konstrukcja punktów osnowy tramwajowej mogłaby pozwalać również na wykorzystanie adapterów umożliwiających montaż pryzmatu lub tarczy celowniczej [2].

Wprowadzenie takiego rozwiązania pozwala na wyniesienie obliczonych w projekcie regulacji przesunięć osi toru na strzałki na cięciwie między sąsiednimi punktami osnowy. Dane niezbędne do realizacji tego procesu to numery oraz kilometrąż znaku, odległości osi toru od znaku, odległości od znaku wzdłuż cięciwy oraz wartości strzałek na cięciwie.

5. Podsumowanie i wnioski

Przedstawiona w artykule technika naziemnego skaningu laserowego posiada duże możliwości i szeroki zakres zastosowania. Skaningu łączy dwie istotne i pożądanymi zalety: wydajność oraz precyzję pomiaru. Dostarcza w krótkim czasie znacznej ilości szczegółowych danych przestrzennych przy jednoczesnej wygodzie pomiaru i integracji z innymi technikami pomiarowymi (tachymetria, niwelacja oraz pomiary satelitarne). W opracowywanym przypadku wykorzystana technologia pomiarowa pozwoliła na zbadanie i inwentaryzację nawierzchni stalowej. Charakterystyka danych uzyskanych metodą skaningu laserowego stwarza możliwość wykonania dodatkowych analiz m.in. skrajni budowli, trakcji, elementów konstrukcyjnych oraz położenia peronów.

Zaproponowana technika ma również pewne ograniczenia. Istotny wpływ na zasięg i dokładność pomiaru ma charakter powierzchni mierzonego obiektu. Jej zawilgocenie lub zanieczyszczenie może niekorzystnie wpłynąć na wymienione parametry. W skrajnych przypadkach skuteczny pomiar jest niemożliwy. Niedogodnościami mogą być także duży rozmiar plików pomiarowych oraz redundancja danych.

Obserwacje wymagały uprzedniego połączenia w procesie rejestracji chmur punktów. Otrzymany model 3D stanowi kompletne zobrazowanie powierzchni mierzonego obiektu. Może być dowolnie przetwarzany i opracowywany w programie komputerowym. Po wygenerowaniu z chmury punktów przekrojów poprzecznych przez tunel możliwe jest pozyskanie przestrzennych współrzędnych odpowiednich punktów na obu tokach szynowych. Są one bazą dla dalszych badań i umożliwiają obliczenie współrzędnych osi toru oraz jego szerokości i przechyłki.

Zastosowanie skaningu laserowego w inwentaryzacji nawierzchni stalowej toru tramwajowego wymaga starannego podejścia do planowania pomiaru. Istotna jest jego odpowiednia konfiguracja i koncentracja na konkretnym obiekcie. Zasadniczym zagadnieniem jest prowadzenie pomiaru w taki sposób, by zapewnić jak najlepsze przestrzenne odwzorowanie szyny. W przypadku pomiarów na potrzeby badań toru tramwajowego stanowiska pomiarowe powinny być lokalizowane między tokami szynowymi. Korzystne byłoby także zwiększenie rozdzielczości pomiaru punktów przez skaner (w efekcie gęstości chmury punktów) oraz zmniejszenie odległości między kolejnymi stanowiskami. Planując pomiar należy wystrzegać się miejsc, w których powierzchnia obiektu nie została odwzorowana ze względu na występujące przesłonięcie (tzw. martwe pole).

Pozyskane dane umożliwiły wykonanie projektu regulacji osi toru tramwajowego w płaszczyźnie poziomej i pionowej oraz dokonania analiz szerokości i przechyłki. Na ich ostateczną dokładność ma wpływ kilka składowych. Dla opracowanego na potrzeby artykułu materiału pomiarowego wyniosła ona w granicach 10 mm. Zależy ona od wyników pomiaru tachymetrycznego, skaningowego, procesu rejestracji chmur, a także identyfikacji odpowiednich punktów. Po zastosowaniu się do powyższych udoskonaleń, technika powinna spełniać założone wymagania dokładnościowe dla wyznaczenia położenia toru oraz regulacji jego osi. Należy zwró-

cić uwagę na niewielki zakres regulacji i mały margines błędu w przypadku toru w technologii tzw. szyny pływającej, umieszczonej w płycie betonowej.

Ważnym zagadnieniem dla dalszego rozwoju prac z wykorzystaniem skaningu laserowego i zwiększenia osiąganych dokładności jest optymalizacja i automatyzacja procesów łączenia chmur punktów oraz generowania przekrojów pomiarowych. W toku dalszych badań otrzymane wyniki warto odnieść do pomiarów wzorcowych, wykonanych przyrządami ręcznymi lub wózkem pomiarowym. Technika skaningu laserowego może być traktowana jako uzupełniająca lub w pewnych przypadkach alternatywna dla technik wskazanych w normach i wytycznych.

W artykule zawarta została propozycja zastosowania dodatkowej osnowy dla wybranych odcinków tramwajowych. Osnowa tramwajowa może być nawiązaniem dla pomiarów geodezyjnych oraz stanowić bazę do wyniesienia z miar regulacji nowej osi toru. Zaproponowana osnowa mogłaby dodatkowo wykorzystywać konstrukcje pozwalające na montaż reflektora pryzmatycznego, bądź tarczy celowniczej do pomiaru skaningowego.

Dokonując przeglądu i analizy przepisów i wytycznych dotyczących projektowania, badań i eksploatacji torowisk tramwajowych [8,9,16,17] zwrócono uwagę na potrzebę ich uporządkowania i ujednoczenia. Odpowiednio zaktualizowane przepisy mogłyby stanowić instrukcje dla komunikacji tramwajowej, analogicznie do istniejących instrukcji kolejowych. Ułatwiłoby to w znaczący sposób prace projektowe i pomiarowe oraz stanowiłoby impuls do dalszego rozwoju systemów miejskiej komunikacji szynowej.

Bibliografia

- [1] Ajszpur B., Dudek P., Lisowski S., Geodezyjne pomiary skrajni budowli metodą skaningu laserowego na przykładzie stacji kolejowej. Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP Oddział w Krakowie, 2010, nr 154, s. 395-408.
- [2] Jamka M., Lisowski S., Strach M., Możliwości wykorzystania nowej kolejowej osnowy geodezyjnej dla potrzeb modernizacji linii kolejowych. Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP Oddział w Krakowie, 2010, nr 95, z. 154, s. 227-246.
- [3] Jamka M., Lisowski S., Strach M., Zastosowanie nowoczesnych technik pomiaru i oprogramowania do regulacji osi torów. Technika Transportu Szynowego, 2009, nr 11, s. 55-61.
- [4] Lenda G., Strach M., Określanie geometrii tras szynowych z wykorzystaniem aproksymacyjnych funkcji sklepanych. Pomiary, Automatyka, Kontrola, 2012, nr 12, s.1082-1086.
- [5] Lenda G., Strach M., Zastosowanie skaningu laserowego do inwentaryzacji tunelu kolejowego. Przegląd Komunikacyjny, 2011, r. 66, nr 9-10, s.78-83.

- [6] Ostaszewicz J., Rataj M., Szybka komunikacja miejska. WKiŁ, 1979, Warszawa.
- [7] Pejić M., Design and optimisation of laser scanning for tunnels geometry inspection, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, Vol. 37, 8/2013, s. 199-206.
- [8] PN-K-92009:1998. Komunikacja miejska - Skrajnia budowli – Wymagania.
- [9] PN-K-92011:1998. Torowiska tramwajowe - Wymagania i badania.
- [10] Projekt wykonawczy budowy linii szybkiego tramwaju N-S wraz z infrastrukturą techniczną i komunikacyjną. 2008, ZIKiT w Krakowie.
- [11] Richards J.A., Inspection, maintenance and repair of tunnels: International lessons and practice, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1998, Vol. 13, Issue 4, October–December 1998, s. 369-375.
- [12] Ryż A., Ryż K., *Krakowski Szybki Tramwaj. Geoinżynieria: drogi, mosty, tunele*, 2009, nr 1 (20), s. 14-23.
- [13] Standard techniczny „O organizacji i wykonywaniu pomiarów w geodezji kolejowej” GK-1. 2015, [Dostęp online:] <http://pkpsa.pl/nieruchomosci/geodezja-i-kartografia/download/Standard-techniczny-O-organizacji-i-wykonywaniu-pomiarw-w-geodezji-kolejowej-GK-1.pdf>
- [14] Strach M., Pomiary dróg kolejowych i obiektów z nimi związanych oraz opracowanie wyników na potrzeby modernizacji kolei konwencjonalnych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 2009, Vol. 19, s. 411-422.
- [15] Strach M., *Nowoczesne techniki pomiarowe w procesie modernizacji i diagnostyki geometrii torów kolejowych*. Wydawnictwo AGH, 2013, Kraków.
- [16] Tymczasowe wytyczne do projektowania szybkiej komunikacji tramwajowej. 1981, Ministerstwo Administracji, Gospodarki Terenowej i Ochrony Środowiska, Departament Komunikacji Miejskiej i Dróg, Warszawa.
- [17] Wytyczne techniczne projektowania, budowy i utrzymania torów tramwajowych. 1983, Ministerstwo Administracji, Gospodarki Terenowej i Ochrony Środowiska, Departament Komunikacji Miejskiej i Dróg, Warszawa.
- [18] Wang Weixing, Zhao Weisen, Huang Lingxiao, Vimarlund Vivian, Wang Zhiwei, Applications of terrestrial laser scanning for tunnels: a review, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2014, Vol. 1, Issue 5, October 2014, s. 325-337.

