

# Ocena przydatności różnych technik pomiaru geometrii układów torowych do opracowania projektów regulacji osi toru

## Analysis of railway track geometry measurement methods usability



**Waldemar Odziemczyk**

Dr inż.

Wydział Geodezji i Kartografii,  
Politechnika Warszawska

waldemar.odziemczyk@pw.edu.pl



**Marek Woźniak**

Dr hab. inż. prof. PW

Wydział Geodezji i Kartografii,  
Politechnika Warszawska

marek.wozniak@pw.edu.pl

**Streszczenie:** Do opracowania projektu regulacji osi toru niezbędna jest precyzyjna informacja, dotycząca rzeczywistego przebiegu tej osi. Informacja ta jest zazwyczaj pozyskiwana metodami geodezyjnymi, przy czym najpopularniejszą metodą była do niedawna metoda pomiaru strzałek. Rozwój geodezyjnych technik pomiarowych umożliwia wykorzystanie do tego celu innych metod, w tym: metody tachymetrycznej, metod wykorzystujących obserwacje satelitarne oraz nowatorskich metod pomiarowych, bazujących na wykorzystaniu specjalistycznych, mobilnych zestawów pomiarowych. W celu praktycznego sprawdzenia przydatności nowych metod pozyskiwania danych przestrzennych do opracowywania projektów regulacji osi toru przeprowadzone zostały badania eksperymentalne. Pomiaru eksperymentalne wykonano na 3 km odcinku dwutorowym. W ramach przeprowadzonych badań przeanalizowano pomiary z wykorzystaniem następujących metod:

tradycyjnej metody pomiaru strzałek, metody tachymetrycznej, metody wykorzystującej technikę GNSS, metody zautomatyzowanej, realizowanej w wariancie jedno- i dwuwózkowym. Wymienione metody porównano pod względem pracochłonności czynności pomiarowych, czasu trwania pomiaru, zakresu uzyskiwanych danych o obiekcie, kosztów sprzętu pomiarowego, niezawodności oraz dokładności procesu pomiarowego. Ponieważ różne metody pomiarowe dostarczają różnych wielkości geometrycznych, porównanie dokładności tych metod pomiarowych oparto na porównaniu wielkości strzałek. Porównanie danych geometrycznych uzyskiwanych za pomocą analizowanych metod pomiarowych pozwoliło na sformułowaniu wniosków, dotyczących przydatności tych metod do wykonywania projektów regulacyjnych.

**Słowa kluczowe:** Geometria toru; Regulacja osi toru; Pomiaru geodezyjne; Wózki pomiarowe; Systemy GNSS; Mobilne systemy pomiarowe

**Abstract:** Precise information of railway tracks geometry is necessary to design alignment project. Geodetic measurements are the most common method of determining this information and sags of arch direct measurement are the traditional and still popular measurement method. Development of geodetic measurements techniques made possible to use another methods such as tacheometry, GNSS, and new methods based on mobile measurement devices. Series of experiments were conducted to set the practical usability of selected modern measurement methods to design track alignment project. The experimental measurements were performed on the 3 km long two-track railway fragment. Following methods were used during the test measurements: sags of arch direct measurement, tacheometry with total station, GNSS, automated methods with the use of a trolley system. Above mentioned measurement methods were compared taking into account time and labour consumption, range of geometric data, measurement equipment cost, reliability and accuracy of surveying procedure. Because of different data types are delivered with various methods, sags of arch were used for comparison of accuracy. Comparison of geometrical data obtained with analysed methods allowed to formulate conclusions concerning practical usability those methods for track alignment project development.

**Keywords:** Track Geometry; Railway Track Alignment; Geodetic Measurements; Trolley Systems; GNSS

Na wielu magistralnych liniach kolejowych prowadzona jest aktualnie modernizacja mająca na celu dostosowanie tych linii do prędkości 160 km/h. Jednym z elementów prowadzonych modernizacji jest zmiana geometrii osi torów niezbędna do zapewnienia odpowiedniego bezpieczeństwa ruchu i komfortu jazdy. Jest to szczególnie istotne dla szlaków przeznaczonych dla pociągów pasażerskich. Wiąże się to z koniecznością zachowania odpowiednich promieni krzywizny łuków kołowych oraz odpowiednich długości krzywych przejściowych.

Osobną kategorię stanowią linie kolejowe niższych kategorii. W wielu przypadkach stan torów na takich liniach wskazuje na ich znaczne deformacje stanowiące realne zagrożenie dla bez-

pieczeństwa ruchu i wymuszające ograniczenia prędkości (fot. 1). Działania naprawcze w przypadku takich odcinków polegają często na doprowadzeniu do regularności zmian krzywizny toru w płaszczyźnie poziomej, zaś projekt regulacji osi toru opracowywany jest w oparciu o założenie optymalnej geometrii przy minimalizacji przesunięć toru. Rygorystyczne przestrzeganie zasady minimalizacji przesunięć prowadzi do powstawania złożonego układu geometrii osi regulowanego toru. Realizacja takiego projektu spełnia co prawda zasadniczy cel jednak, jak zauważyli autorzy opracowania [4], duża liczba elementów geometrycznych utrudnia utrzymanie takiego toru.

Niezależnie od celu i związanych z tym założeń przyjętych do opracowania

projektu regulacji torów linii kolejowej niezbędna jest szczegółowa informacja o ich rzeczywistym stanie geometrycznym. Źródłem dokładnych i niezawodnych informacji przestrzennych o torze są pomiary wykonywane metodami geodezyjnymi.



1. Fragment linii kolejowej o silnie zdeformowanych torach

## Pomiary geodezyjne jako źródło informacji o geometrii osi torów

Do wyznaczenia rzeczywistego przebiegu osi torów wykorzystuje się różne metody i techniki pomiarowe, w tym:

- metodę bezpośredniego lub pośredniego pomiaru strzałek,
- metodę biegunową z wykorzystaniem tachimetrów,
- metody wykorzystujące obserwacje satelitarne,
- metody wykorzystujące różnego rodzaju rozwiązania mechaniczne i elektroniczne np. wózki pomiarowe, wyposażone w sensory pochyleń, ekstensometry oraz urządzenia inercyjne, skanery laserowe oraz kamery cyfrowe.

Metody te różnią się zarówno pod względem rodzaju dostarczanej informacji, dokładności, kosztów niezbędnych elementów pomiarowych, pracochłonności procesu pomiarowego oraz uwarunkowań technicznych decydujących o możliwości wykonania pomiaru z odpowiednią dokładnością. Sposób wykonywania pomiarów geodezyjnych określają odpowiednie instrukcje, standardy techniczne oraz wytyczne wydawane przez podmioty zarządzające infrastrukturą kolejową. Można tu wymienić wytyczne Ig-6 [9] oraz standard techniczny Ig-7 [10] określające sposób zakładania osnowy kolejowej a także standard techniczny GK-1 [8], który zastąpił obowiązującą wcześniej instrukcję D-19 [7]. Ponieważ opisywane w niniejszym opracowaniu pomiary eksperymentalne były na życzenie zlecającego wykonywane zgodnie z instrukcją D-19, w opisie czynności pomiarowych będzie cytowany także ten dokument.

**Metoda pomiaru** strzałek jest stosowana od dawna. Jest prosta i tania w realizacji. Wynikiem pomiaru w tej metodzie jest odległość badanego punktu na torze od cięciwy wyznaczonej przez dwa punkty odniesienia. Może być wykorzystywana cięciwa mechaniczna (struna) lub optyczna – realizowana za pomocą instrumentu wspomagającego. Długość

cięciwy, na jakiej wykonywany jest pomiar strzałki zależy od wielkości krzywizny łuku, przy czym na krzywej przejściowej (o zmiennej wartości krzywizny) stosuje się taką samą długość cięciw jak na następującym za nią łuku kołowym.

Strunę stosuje się w przypadku cięciw nie przekraczających 10 m. Dla cięciw dłuższych stosuje się wyłącznie teodolit. Niezależnie od zastosowanego wariantu realizacji cięciwy wymagana dokładność pomiaru wartości strzałki wynosi ok.  $\pm 1$  mm. Pomiar strzałek wykonuje się dwukrotnie.

W przypadku pomiaru wykonywanego teodolitem, możliwe są dwa sposoby pomiaru strzałek:

- 1) sposób bezpośredni – gdzie cięciwa jest bezpośrednio oparta o punkty końcowe (rys. 2).
- 2) sposób pośredni – gdzie pomiar strzałek polegający na pomiarach zbliżonych do tzw. metody stałej prostej. (rys. 3).

W przypadku sposobu pośredniego strzałki dla krótszych cięciw mogą być uzyskane poprzez odpowiednie przeliczenie wg wzoru (dla równych odległości między mierzonymi punktami na torze):

$$s_i = d_i - \frac{d_{i+1} + d_{i-1}}{2}$$

gdzie  $d_i, d_{i-1}, d_{i+1}$  – pomiary od prostej odniesienia odpowiednio na punkcie bieżącym, poprzednim i następnym

Celem pomiaru jest pozyskanie informacji o geometrii osi toru. Tymczasem pomiarowi podlega jedna z szyn. Należy zatem, zwłaszcza w przypadku małych promieni krzywizny, sprawdzić jaka będzie różnica pomiędzy strzałką, dla wybranej szyny a odpowiadającą jej strzałką osi toru.

Na wartości mierzonych strzałek wpływa także sposób identyfikacji wewnętrznej krawędzi tocznej szyny. Do pomiarów geometrii osi torów krawędź tę (wg instrukcji Id-14 [12]) określa punkt przekroju poprzecznego szyny położony 14 mm poniżej górnej powierzchni tocznej szyny (rys. 4a). Definicja ta jest uwzględniona w konstrukcji wózków pomiarowych i toromierzy wykorzy-

stywanych do pomiarów kolejowych. Tymczasem w przypadku bezpośredniej metody pomiaru strzałek, bardzo często mierzone jest najbardziej wystające w kierunku poziomym miejsce główki szyny (rys. 4b). Powoduje to występowanie w uzyskiwanych wynikach pomiaru różnicy  $\Delta s$ . Wielkość ta może mieć istotną wartość w przypadku znacznego i nierównomiernego zużycia szyn (rys. 4c).

Ze względu na dużą pracochłonność oraz podatność na błędy pomiarowe o charakterze systematycznym metoda bezpośredniego pomiaru strzałek nie jest zalecana [1, 8]. Metoda pośredniego pomiaru strzałek ma uzasadnienie jedynie w przypadku krótkich cięciw mierzonych za pomocą struny.

Dokładności określenia przebiegu toru przy zastosowaniu pomiaru metodą strzałek pozwalają stosować tę metodę do opracowania projektów regulacji toru jak i dla pomiarów kontrolnych dla linii kolejowych nawet o znacznych prędkościach (do 200 km/h).

## Pomiar przebiegu osi toru metodą biegunową (tachimetryczną)

wymaga użycia precyzyjnego tachimetru elektronicznego. Według instrukcji D-19 [7] powinien to być tachimetr o dokładności pomiaru kąta wyższej niż 10cc i dokładności pomiaru odległości co najmniej  $\pm(10\text{mm} + 10\text{ mm/km})$ . Standard techniczny Ig-7 wprowadza obowiązek dowiezienia stanowiska tachimetru do co najmniej trzech znaków kolejowej osnowy szczegółowej. Błąd wyznaczenia położenia stanowiska nie może w tym przypadku przekroczyć wartości  $\pm 15$  mm, zaś długość celowych do mierzonego punktu na torze (wg Ig-7) nie może przekraczać 200 m.

W wyniku pomiaru metodą biegunową uzyskuje się pozycje poszczególnych punktów określających oś toru. Punkty te mogą być pomierzone bezpośrednio. W tym przypadku do identyfikacji osi toru niezbędny jest użycie odpowiedniego przyrządu.

Na odcinku prostoliniowym sytuacja jest prosta, ponieważ szerokość toru wynosi 1435 mm. Oś toru jest zazwy-



2. Bezpośredni pomiar strzałek



3. Pośredni pomiar strzałek



4. Zasada ustalania położenia punktu pomiarowego na główce szyny

czas definiowana jako linia odsunięta od jednej z szyn o połowę prześwitu – czyli 717.5mm. Alternatywnym sposobem jest wyznaczenie punktu w połowie odległości między szynami. Opracowany przez autorów przyrząd przedstawiony na fot. 5 umożliwia lokalizację osi toru w połowie odległości między szynami.

Osadzenie reflektora na wysokości górnej powierzchni główek szyn eliminuje wpływ nachylenia przyrządu na wyniki pomiaru, w przypadku występowania przechyłki poprzecznej toru na odcinkach łuków.

Innym sposobem uzyskania pozycji punktu osiowego toru jest jej obliczenie na podstawie pomierzonych pozycji punktów na szynach. Rozwiązanie takie zastosowali autorzy opracowania [3].

Istnieje szeroka gama urządzeń pomiarowych kwalifikowanych jako tzw. wózki pomiarowe. Działają one na różnych zasadach i dostarczają różnego typu wielkości. Niektóre z nich służą do pomiaru lokalnej krzywizny toru, inne pozwalają uzyskać pozycje punktów osiowych toru. Jedne i drugie pozwalają rejestrować wielkość przechyłki poprzecznej i rzeczywistą wartość rozstawu szyn. Opis i analizę przydatności różnych rodzajów urządzeń pomiarowych do pomiaru torów zawierają między innymi opracowania [5] i [6].

Spośród metod wykorzystujących wózki pomiarowe przeanalizowano oraz poddano testom praktycznym dwie metody:

- metodę jednowózkową,
- metodę dwuwózkową.

Obydwie metody pozwalają uzyskać

współrzędne punktów osiowych mierzonego toru oraz dwa elementy dodatkowe jak przechyłka poprzeczna i rozstaw szyn.

**W metodzie jednowózkowej** wykorzystuje się jeden wózek pomiarowy z zamontowanym na nim reflektorem zwrotnym oraz sensorami nachyleń i rozstawu szyn oraz tachimetr elektroniczny ustawiony, podobnie jak w metodzie tachimetrycznej, w rejonie mierzonego torowiska (fot. 6).

Stanowisko tachimetru jest nawiązywane do punktów KOS w sposób identyczny jak w metodzie tachimetrycznej. Po wykonaniu pełnego nawiązania do punktów osnowy tachimetr przechodzi w tryb śledzenia reflektora zamontowanego na wózku. W ustalonych miejscach wózek jest zatrzymywany, po czym wykonany jest pomiar i rejestracja położenia reflektora. Niezależnie od tachimetru wózek mierzy kąty nachylenia w kierunku podłużnym i poprzecznym oraz rozstaw szyn. Na podstawie tych wielkości możliwe jest wyznaczenie punktu osi toru na podstawie położenia reflektora umieszczonego - najczęściej ekscentrycznie - na wózku.

Co do zasady, pomiar punktów osi toru metodą jednowózkową nie różni się od pomiaru metodą tachimetryczną. Najistotniejsze różnice wynikają z faktu, że w metodzie wózkowej pozyskiwane są dodatkowe parametry toru tj. rozstaw i przechyłki. Parametry te są cenną wskazówką do prowadzenia analiz stanu toru i w dalszej kolejności do opracowania projektu jego regulacji.

U podstaw **metody dwuwózkowej** leży dążenie do przyspieszenia pomiaru w celu umożliwienia dostarczania danych do zautomatyzowanych podbijańek w czasie rzeczywistym. W metodzie tej wykorzystuje się dwa wózki pomiarowe, z których jeden jest nośnikiem tachimetru, a drugi służy do zbierania danych o geometrii toru - analogicznie jak w metodzie jednowózkowej.

W metodzie dwuwózkowej każdemu stanowisku odpowiada tzw. cięciwa, czyli odcinek między stanowiskiem tachimetru (na wózku) a ostatnim punktem toru pomierzonym z poprzedniego stanowiska (cięciwy). Stosuje się tu uproszczony sposób nawiązania tachimetru. Schemat pomiaru toru metodą dwuwózkową przedstawia rys. 7. Wózek z tachimetrem zatrzymuje się naprzeciw słupa sieci trakcyjnej ze znakiem KOS (stanowiska Wt1, Wt2). Przed rozpoczęciem właściwego pomiaru toru za pomocą wózka z reflektorem wykonuje się pomiar tachimetrem do bliskiego znaku KOS oraz do reflektora na drugim wózku (Wr0). Położenie wózka z reflektorem Wr0 jest znane z pomiaru na poprzednim stanowisku tachimetru.

Po tak zrealizowanym nawiązaniu rozpoczyna się pomiar punktów toru za pomocą wózka z reflektorem (punkty Wr1 .. Wr5), przy czym ostatni - najbliższy stanowiska - punkt Wr5 pełni funkcję punktu nawiązania na następnym stanowisku (wózka z tachimetrem).

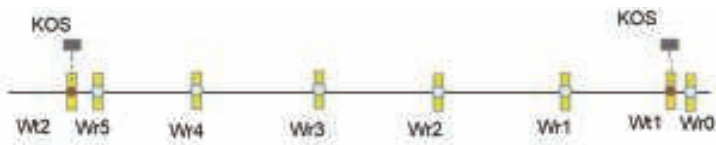
**W metodzie GNSS** do wyznaczenia położenia punktu na torze wykorzystuje się sygnał satelitarny z dostępnych systemów nawigacyjnych oraz poprawki korekcyjne systemu ASG EUPOS. W zależności od sposobu uzyskiwania poprawek korekcyjnych można mówić o systemie RTK (pojedyncza stacja referencyjna) lub RTN (poprawka wyznaczana na podstawie wielu stacji referencyjnych). Ze względu na ograniczenia dokładnościowe przydatność wyników pomiarów wykonanych metodą satelitarną do regulacji osi torów była przed-



5. Przyrząd do identyfikacji i pomiaru osi toru



6. Pomiar torów metodą jednowózkową



7. Schemat pomiaru toru metodą dwuwózkową



8. Zestaw GEDO do pomiaru torów metodą GNSS

miotem licznych analiz i eksperymentów, spośród których można wymienić np. [4] i [6].

Dokładność wyznaczenia współrzędnych zależy od kilku czynników:

- parametrów odbiornika i jego anteny,
- lokalizacji stacji referencyjnej (lub referencyjnych) względem miejsca pomiaru,
- chwilowej konfiguracji satelitów i jakości wcięcia,
- rozmieszczenia przeszkód terenowych i zakłóceń odbioru sygnału z satelitów.

Pierwsze dwa czynniki są dla określonego obiektu pomiaru stałe. Dwa następne zmieniają się w czasie w zależności od aktualnie panujących warunków terenowych. Ocena dokładności uzyskanych współrzędnych jest zazwyczaj dokonywana przez oprogramowanie odbiornika satelitarnego i wykazywana wraz z uzyskanymi współrzędnymi. Użytkownik nie zawsze może wiarygodnie ocenić wielkości wpływu zmiennych czynników na dokładność wyznaczenia współrzędnych.

Fot. 8 przedstawia zestaw do pomiaru osi toru metodą GNSS. Ponieważ antena jest wyniesiona na pewną wysokość względem poziomu główek szyn niezbędny jest pomiar pochyłeń podłużnego i poprzecznego w celu wyeliminowania wpływu ekscentru anteny.

## Eksperyment pomiarowy

W celu określenia praktycznej przydatności wybranych metod pomiaru geometrii osi toru do wykonania projektu regulacji układu torowego wykonano serię pomiarów testowych na wybranym odcinku eksploatowanej linii kolejowej. Odcinek ten miał długość ok. 3 km i był zlokalizowany na dwutorowej linii kolejowej nr 12 Skierniewice – Łu-

ków pomiędzy miejscowościami Osieck i Grabianka (rys. 9). Od strony geometrycznej każdy z torów składał się z trzech odcinków prostych oraz dwóch krzywoliniowych. Każdy z odcinków krzywoliniowych składał się z dwóch łuków koszowych oraz z dwóch kłotoid.

Przed wykonaniem pomiaru osi torów została założona geodezyjna osnowa kolejowa. Składała się na nią kolejowa pozioma osnowa podstawowa oraz kolejowa osnowa szczegółowa tzw. KOS. Zarówno osnowa podstawowa jak i szczegółowa została pomierzona zgodnie z zaleceniami standardu technicznego Ig-7 [10]. Osnowa podstawowa składała się z trzech par punktów oddalonych od siebie o około 1,5 km (rys. 9). Punkty te pomierzono metodą satelitarną. Osnowa szczegółowa składała się ze 102 znaków KOS, zastabilizowanych na słupach sieci trakcyjnej zgodnie z wytycznymi Ig-6 [9]. Do pomiaru osnowy szczegółowej wykorzystano metodę trzech statywów. Pomiar wykonano w nawiązaniu do osnowy podstawowej.

Do pomiaru osnowy szczegółowej zastosowano tachimetr TDA 5005, a wykonane obserwacje były wyrównane metodą ścisłą. Tym sposobem uzyskano wysokie dokładności położenia wszystkich punktów w osnowy kolejowej, która stanowiła odniesienie dla wszystkich późniejszych pomiarów, realizowanych w ramach eksperymentu.

Współrzędne punktów osnowy, zarówno podstawowej, jak i szczegółowej wyznaczono w dwóch układach: Układzie PL 2000 (strefa 7) oraz w układzie lokalnym. Dla lokalnego układu współrzędnych przyjęto odwzorowanie Gaussa-Krügera z południkiem osiowym przechodzącym przez środek odcinka testowego. Jako lokalny poziom odniesienia wysokościowego przyjęto natomiast średni poziom terenu. Dzięki takiemu założeniu układu lokalnego można było zaniedbać redukcje odwzorowawcze do mierzonych odległości bez narażania się na utratę dokładności wyznaczania pozycji punktów charakterystycznych toru.

Rozwiązanie takie przyjęto w celu zbadania możliwości wykorzystywania różnych układów współrzędnych tak do opracowania wyników pomiarów terenowych jak i opracowania projektów regulacji osi torów.

Pomiar geometrii os torów wykonano niezależnie każdą z pięciu metod wymienionych w poprzednim rozdziale.



9. Rozmieszczenie punktów osnowy podstawowej



10. Przyrząd pomocniczy do ustalania osi toru

W przypadku metody strzałek, jak i metody tachymetrycznej do wyznaczania osi toru zastosowano autorski przyrząd pomocniczy przedstawiony na rys. 10.

W metodach "wózkowych" oraz w metodzie GNSS identyfikację punktu osiowego toru (14mm poniżej powierzchni tocznej szyn) zapewniała konstrukcja wózka. W metodzie strzałek oraz tachymetrycznej funkcję tą pełnił przyrząd przedstawiony na fot. 5 i 10. Niezależnie od metody pomiarowi podlegały te same punkty rozmieszczone co 20m na odcinkach prostoliniowych oraz co 10m na odcinkach krzywoliniowych.

## Porównanie wyników pomiarów eksperymentalnych

Podstawowym celem pracy badawczej było porównanie przydatności danych uzyskanych za pomocą różnych metod pomiarowych, do opracowania projektu regulacji osi toru.

Porównania tego można dokonać na dwa sposoby:

- poprzez porównanie wyników opracowanych projektów regulacji,
- poprzez porównanie wyników pomiarów przestrzennych punktów reprezentujących układ analizowanych torów.

Realizacja pierwszego z tych sposobów natrafia na trudność natury algorytmicznej. Autorzy [3] zwracają uwagę, że metody opracowania projektu regulacji różnią się w zależności od rodzaju danych źródłowych. Dotyczy to w szczególności metody pomiaru strzałek, dla której projekt regulacji powstaje etapami (najpierw proste później łuki) [2]. Wykorzystując współrzędne punktów szczegółowych osi torów, przy zastosowaniu nowoczesnego oprogramowania, można opracować projekt regulacji w procesie jednoetapowym. W konsekwencji, nawet projekty regulacji opracowane na podstawie identycznych danych (np. na podstawie współrzędnych oraz strzałek obliczonych w oparciu o te same współrzędne) będą różne.

Próba porównania wyników pomiaru natrafia również na pewne trudności. Po pierwsze, różne metody dostarczają różnych wielkości obserwowanych, których bezpośrednio porównanie jest niemożliwe. Po drugie, nawet w przypadku metod dostarczających współrzędnych XY istnieją różnice wynikające nie z dokładności pomiaru, ale ze specyficznego dla pomiarów kolejowych sposobu

ustalania mierzonego punktu.

Punkty toru podlegające pomiarowi są zaznaczane na szynach w ustalonych odległościach przed rozpoczęciem pomiaru. Instrukcja D-19 [7] narzucała korzystanie w tym celu ze skomparowanej taśmy stalowej. Nawet jednak przy zastosowaniu precyzyjnego sprzętu pomiarowego i starannym oznaczeniu punktów na szynach dokładność ich ustalenia w kierunku wzdłuż osi toru nie będzie lepsza niż 1cm, podczas gdy identyfikacja położenia osi toru w kierunku poprzecznym (zgodnie z instrukcją Id-14) będzie znacznie dokładniejsza.

W rezultacie, kilkakrotny pomiar położenia tego samego punktu toru, nawet przy zastosowaniu najdokładniejszej metody da różniące się wyniki.

Wielkością geometryczną umożliwiającą porównanie wyników pomiaru osi toru różnymi metodami może być wartość strzałki osi toru. Jest ona bezpośrednio mierzona w metodzie strzałek, zaś w przypadku metod dostarczających współrzędnych może być obliczona. Jednocześnie wartość strzałki jest mało wrażliwa na drobne różnice w ustaleniu miejsca pomiaru wzdłuż osi toru. W związku z powyższym autorzy zestawili wartości strzałek na podlegających pomiarowi punktach osi toru, a następnie przeanalizowali różnice pomiędzy odpowiadającymi sobie wartościami strzałek uzyskanymi z różnych metod pomiarowych.

Tabele 1 i 2 zawierają zestawienie różnic strzałek dla wszystkich kombinacji par metod. Przedstawione w tabelach wartości uzyskano z zależności:

$$f = \sqrt{\frac{\sum (s_i - s_j)^2}{n}}$$

gdzie:

$s_i, s_j$  - wartości odpowiadających sobie strzałek z metod  $i$  oraz  $j$ ,

$n$  - liczba wspólnych strzałek wyznaczonych obydwiema metodami

Jak można zauważyć najlepszą zgodność wyników uzyskano dla metod wykorzystujących wózki pomiarowe. Odchylenie standardowe dla tych przypadków wyniosło  $\pm 0.8 \div 0.9$  mm. Jest to uzasadnione wysoką jakością zastosowanego sprzętu pomiarowego, a co za tym idzie, precyzją pomiaru. Duże znaczenie miała także jednakowa (wymuszona konstrukcją wózka) w obydwu metodach identyfikacja mierzonego punktu osi toru. Nieznacznie gorszą zgodność, bo  $\pm 1.0 \div 1.3$  mm, uzyskano pomiędzy meto-

dą bezpośredniego pomiaru strzałek a metodami "wózkowymi". Dla metody tachymetrycznej zgodność w stosunku metod wózkowych jak i metody bezpośredniego pomiaru strzałek wahała się na poziomie  $\pm 1.5 \div 1.7$  mm. Pomimo pewnych różnic w zakresie wzajemnej zgodności wymienione metody można określić jako wysokodokładne. Zalecane metody tachymetrycznej, podobnie jak metod „wózkowych” jest odniesienie wyników do osnowy geodezyjnej. Metoda tachymetryczna jest przy tym znacznie tańsza od metod wózkowych. Na tym tle znacząco odbiegają wyniki uzyskane metodą GNSS. Zgodności w stosunku do pozostałych metod wahały się w zakresie od  $6.4 \div 8.9$  mm, przy czym należy zaznaczyć, że pomiar tą metodą był wykonany na odcinku toru o optymalnych warunkach do pomiaru satelitarnego. Ponadto należy pamiętać, że technologia pomiarów satelitarnych wymaga widoczności odpowiedniej konstelacji satelitów. Warunek ten nie zawsze jest możliwy do spełnienia (teren zalesiony, zabudowany, wiadukty, tunele itp.). W sytuacji tych nastąpi istotny spadek dokładności lub pomiar będzie niemożliwy.

Na podstawie przeprowadzonych testów oraz wymagań dokładnościowych określonych w załączniku nr 13 do instrukcji Id-1 [11] można określić zakres przydatności opisywanych metod do opracowania projektu regulacji osi toru oraz do pomiaru kontrolnego osi toru (tab. 3).

Metoda satelitarna nie pozwala na uzyskiwanie danych o lokalnych deformacjach osi toru z dokładnością porównywalną z pozostałymi metodami, ma jednak ważną zaletę. Nie generuje wzrostu błędów wraz ze wzrostem długości mierzonego odcinka toru, umożliwiając tym samym opracowanie projektu regulacji w jednolitym układzie współrzędnych. Na zalety zastosowania pomiarów GNSS do zadań związanych z regulacją torów zwrócili uwagę autorzy opracowań [4] i [1]. Metoda ta jest bardzo prosta w realizacji i doskonale nadaje się do automatyzacji pomiaru. Dalszy wzrost możliwości pomiarów satelitarnych możliwy będzie po zastosowaniu sensorów inercjalnych pozwalających rejestrować dane pomiarowe także w przypadku zaniku sygnału satelitarnego.

**Tab. 1.** Różnice odpowiadających sobie strzałek dla toru 1

	strzałki	tachimetria	1 wózek	2 wózki	GNSS
strzałki	-	1.5	1.1	1.0	6.4
tachimetria	1.5	-	1.7	1.7	7.4
1 wózek	1.1	1.7	-	0.9	6.4
2 wózki	1.0	1.7	0.9	-	6.5
GNSS	6.4	7.4	6.4	6.5	-

**Tab. 2.** Różnice odpowiadających sobie strzałek dla toru 2

	strzałki	tachimetria	1 wózek	2 wózki	GNSS
strzałki	-	1.6	1.3	1.2	8.1
tachimetria	1.6	-	1.7	1.7	8.9
1 wózek	1.3	1.7	-	0.8	8.3
2 wózki	1.2	1.7	0.8	-	8.2
GNSS	8.1	8.9	8.3	8.2	-

## Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych na odcinku testowym pomiarów, można wysnuwać szereg wniosków, odnośnie przydatności badanych metod pomiaru osi torów do prowadzenia procesów regulacji stanu układu torowego.

Dobór optymalnej metody pomiaru geometrii układu torowego zależy od uwarunkowań techniczno-ekonomicznych stawianych wykonawcy oraz warunków panujących w terenie.

Stawiając na pierwszym miejscu tempo przeprowadzania pomiaru oraz zakres pozyskiwanych danych o geometrii toru, optymalnym wyborem będą systemy zautomatyzowane np. systemy pomiarowe wykorzystujące wózki pomiarowe. Warto zauważyć, że w zautomatyzowanych systemach pomiarowych oprócz położenia punktów osi toru rejestrowane są także rozstaw szyn oraz przechyłka i pochylenie podłużne toru w miejscach pomiaru.

Pomiar tradycyjny metodą strzałek pozwala uzyskać w stosunkowo prosty sposób i za pomocą niedrogo sprzętu dane o lokalnej geometrii toru. Zaletą tej metody jest wysoka dokładność względna, natomiast jej mankamenty to brak możliwości automatyzacji po-

**Tab. 3.** Maksymalna prędkość projektowa trasy dla poszczególnych metod pomiaru osi toru

metoda pomiaru	maksymalna prędkość projektowa trasy [km/h]
pomiar strzałek	200
tachimetria	200
jednowózkowa	200
dwuwózkowa	200
GNSS	100

miaru i wynikająca z tego większa, niż w przypadku innych metod pracochłonność. Poza tym, dysponując jedynie informacją o lokalnej krzywiznie toru nie możemy skorzystać z nowoczesnego oprogramowania pozwalającego na kompleksowe opracowanie projektu regulacji.

Zaletą metody GNSS jest jej prostota i szybkość wykonania pomiaru. Nie bez znaczenia jest też niewrażliwość tej metody na lokalne zmiany dokładności osnowy geodezyjnej. Dzięki wsparciu systemu ASG-EUPOS do wykonania pomiaru wystarczy jeden odbiornik satelitarny. Zastosowanie jako nośnika anteny satelitarnej wózka pomiarowego znacznie usprawnia wykonanie pomiaru. Uzyskiwana dokładność wyników ustępuje dokładności pozostałych metod pomiarowych w zakresie zmian lokalnych.

Rozwiązaniem kompromisowym między bardzo zaawansowanymi technicznie i efektywnymi w pomiarach metodami tzw. „wózkowymi” a prostą, taną, metodą strzałek, jest metoda tachimetryczna. Metoda ta charakteryzuje się wysoką dokładnością i wolna jest od narastających błędów systematycznych metody strzałek. W celu podniesienia dokładności pomiaru wskazane jest korzystanie z toromierzy.

Najodpowiedniejszym rozwiązaniem do kompleksowego pomiaru przestrzennego torów będzie zastosowanie rozwiązań z wózkami pomiarowymi. Pomiar jest szybki, niezawodny i spełnia wszystkie wymagania dokładnościowe standardów, dotyczących pomiarów kolejowych. Ważną zaletą jest również daleko idąca automatyzacja procesu pomiarowego. ◀

## Materiały źródłowe

- [1] Dobrowolski B., Koncepcja numerycznego modelu geometrii torów w procesie napraw nawierzchni. TTS Technika Transportu Szynowego, 2002 (9), s. 58-67
- [2] Dobrowolski B., Geodezja kolejowa. SGP Oddział w Katowicach, Katowice 2014
- [3] Jamka M., Lisowski S., Strach M., Zastosowanie nowoczesnych technik pomiaru i oprogramowania do regulacji osi torów. TTS Technika Transportu Szynowego 2009 (15), s. 55-61
- [4] Koc W., Chrostowski P., Grzejka P., Specht C., Lewiński L., Ocena efektów regulacji osi toru na wybranej linii kolejowej. TTS Technika Transportu Szynowego, 2013 (20), s. 81-84
- [5] 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. 411-421
- [6] Strach M., Piekarczyk M., Nowoczesne urządzenia w pomiarach dróg kolejowych. Problemy kolejnictwa, 2009, Zeszyt 148, s. 48-60.
- [7] Zarząd PKP, Instrukcja o organizacji i wykonywaniu pomiarów w geodezji kolejowej D-19. Załącznik do Zarządzenia Nr 144 z dnia 23 października 2000 r.
- [8] Zarząd PKP S.A. Standard techniczny „o organizacji i wykonywaniu pomiarów w geodezji kolejowej GK-1, Załącznik do uchwały Nr 8 z dnia 12 stycznia 2016 r.
- [9] Zarząd PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Wytyczne dla osadzania znaków regulacji osi toru na konstrukcjach wsporczych (słupach) sieci trakcyjnej Ig-6. Załącznik do zarządzenia Nr 24/2011 z dnia 18 lipca 2011 r.
- [10] Zarząd PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Standard techniczny określający zasady i dokładności pomiarów geodezyjnych dla zakładania wielofunkcyjnych znaków regulacji osi toru Ig-7. Załącznik do zarządzenia Nr 27/2012 z dnia 19 listopada 2012 r.
- [11] Zarząd PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych Id-1, Załącznik do zarządzenia Nr 14/2005 z dnia 18 maja 2005 r. z późniejszymi zmianami.
- [12] Zarząd PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Instrukcja o dokonywaniu pomiarów, badań i oceny stanu torów Id-14 (D-75). Załącznik do zarządzenia Nr 26/2005 z dnia 12 lipca 2005 r.