

Analiza porównawcza metod pomiaru nawierzchni kolejowej stosowanych do oceny jakości geometrycznej toru

Grzegorz Stencel

W opracowaniu zawarto wyniki pomiarów parametrów geometrycznych toru wykonanych po naprawie głównej nawierzchni. Na badanym odcinku wykonano pomiary toromierzem samorejestrującym oraz niwelatorem precyzyjnym. Przedstawiono analizę porównawczą wartości parametrów geometrycznych uzyskanych przy pomiarze obiema metodami.



mgr inż. Grzegorz Stencel
specjalista inżynierijno-
techniczny
Instytut Kolejnictwa

Wprowadzenie

Pomiary nawierzchni kolejowej na sieci PKP PLK S.A. wykonuje się różnymi sposobami, zależnymi przede wszystkim od klasy toru, celu pomiaru oraz dostępnych środków. Wartości parametrów geometrycznych toru (szerokości toru, różnicy wysokości toków szynowych, nierówności pionowych i poziomych, gradientu szerokości oraz wchrowatości) można uzyskać poprzez pomiar ciągły – drezyną pomiarową lub toromierzem samorejestrującym, bądź poprzez pomiar dyskretny – toromierzem ręcznym.

Pomiar toromierzem samorejestrującym jest obecnie najczęściej stosowaną metodą pomiaru przy odbiorach robót. Wyniki pomiarów toromierzem, zgodnie z załącznikiem 15 Warunków Id-1 [1] mogą stanowić (wraz z pomiarem geodezyjnym dotyczącym położenia toru w nawiązaniu do znaków regulacji) jedyną część dokumentacji pomiarowej odnoszącą się do ukształtowania toru w płaszczyźnie pionowej i poziomej. Autor referatu postawił sobie za cel sprawdzenie czy stosowane przy odbiorach robót nawierzchniowych sposoby pomiaru są wystarczające do oceny jakości geometrycznej toru. W referacie nie poruszono natomiast problematyki oceny jakości geometrycznej rozjazdów.

Charakterystyka badanego odcinka

Analizie poddano odcinek toru o długości 1500 m (na linii dwutorowej), po naprawie głównej polegającej na ciągłej wymianie szyn i podkładów oraz oczyszczeniu i uzupełnieniu podsypki. Nawierzchnia wykonana jest z szyn 60E1 o długości 210 m (zgrzewanych w zgrzewalni z odcinków 30-metrowych), połączonych w torze przy pomocy zgrzewarki torowej; na podkładach betonowych typu PS-94, z systemem przytwierdzeń typu SB, na podsypce tłuczniowej. Ze względu na niedokładne oczyszczenie podsypki, a także zabrudzenie drobnymi cząstkami podsypki nowobudowanej, wartość stopnia degradacji nawierzchni (obliczonego wg kryteriów załącznika 14 Instrukcji Id-1) wynosi 0,1. Syntetyczny wskaźnik jakości toru J obliczony na całym odcinku na podstawie pomiaru toromierzem elektronicznym wynosi 1,58.

Tor w przekroju podłużnym położony jest na pochyleniu ok. 5 ‰ (wzniesienie w kierunku wzrastającego kilometraża). Ze względu na małe różnice między pochyleniami, nie projektowano łuków pionowych. Większa część badanego odcinka toru przebiega w łuku poziomym o promieniu 2250 m z przylegającymi krzywymi przejściowymi w postaci paraboli trzeciego stopnia o długości 110 m. Przechyłka toru na łuku wynosi 50 mm, co przy projektowanych prędkościach $v_{max}=100$ km/h oraz $v_t=70$ km/h oznacza, że nierównoważone przyspieszenie dośrodkowe (występujące w taborze towarowym) wynosi $0,16$ m/s², a nierównoważone przyspieszenie odśrodkowe wynosi zaledwie $0,02$ m/s².



1. Nawierzchnia kolejowa na badanym odcinku toru

Metody pomiaru oraz analizowane parametry

W celu porównania metod, wykonano pomiary toru na badanym odcinku toromierzem samorejestrującym z krokiem pomiarowym o wartości 0,5 m oraz niwelatorem precyzyjnym z krokiem pomiarowym 5 m. Krok pomiarowy niwelacji odmierzone przy pomocy toromierza, aby uniknąć błędu pomiaru odległości przy analizie porównawczej obu metod.

Pomiar toromierzem wykonano w kierunku „tam” i „z powrotem”. Otrzymano w ten sposób wartości szerokości, gradientu, przechyłki, wchrowatości oraz nierówności pionowych i poziomych obu toków szynowych. Rozdzielczość pomiaru każdego z tych parametrów wynosi 0,1 mm. Pomiar niwelatorem wykonano na obu tokach szynowych. Pozwala to na obliczenie wartości nierówności pionowych obu toków szynowych oraz przechyłki. Rozdzielczość pomiaru wynosi 0,1 mm. Wyniki pomiarów przechyłki na badanym odcinku zaprezentowano na rysunku 2.

W celu dokładniejszego zobrazowania przebiegu wartości przechyłki, na rysunku 3 przedstawiono jej wykres na łuku.

Zaznaczony czerwonymi liniami zakres odchyłek dopuszczalnych wynosi 3 mm, gdyż do oceny przyjęto dopuszczalną wartość różnicy położenia toków szynowych przy odbiorze toru po naprawie głównej lub modernizacji dla prędkości 200 km/h.

W tabeli 1 przedstawiono podstawowe wartości statystyczne dla przechyłki mierzonej trzykrotnie: poprzez niwelację obu toków szynowych i dwukrotnie toromierzem (przejazd w kierunku „tam” i „z powrotem”). Wartości te podano zarówno dla całości odcinka, jak i dla poszczególnych sekcji (prosta, krzywa przejściowa, łuk).

Wyniki pomiarów nierówności pionowych toków szynowych mierzonych na bazie 10 m przedstawiają rysunki 4 oraz 5. Podobnie jak w przypadku przechyłki, przyjęto wartość dopuszczalną przy odbiorze po naprawie głównej lub modernizacji dla prędkości 200 km/h.

W analizie porównawczej wartości przechyłki i nierówności mierzonych toromierzem i niwelatorem dostosowano krok pomiarowy do niwelacji (5 m), co oznacza, że przyjęto co dziesiątą wartość pomiaru z toromierza i wszystkie wartości uzyskane przy niwelacji.

W tabelach: 2 i 3 przedstawiono podstawowe wartości statystyczne dla nierówności pionowych toku lewego i prawego. Wyniki uzyskano z niwelacji precyzyjnej oraz pomiaru toromierzem. Podczas pomiaru toromierzem w kierunku „tam” wykonano pomiar nierówności pionowych toku lewego, a podczas przejazdu „z powrotem” – toku



2. Wykres przechyłki badanego odcinka toru



3. Wykres przechyłki na łuku

prawego. Wartości te podano zarówno dla całości odcinka, jak i dla poszczególnych sekcji (prosta, krzywa przejściowa, łuk).

Wnioski z analizy

Analiza porównawcza wartości parametrów mierzonych dwoma metodami prowadzi do różnych wniosków. Wykres przechyłki wykonany na podstawie trzykrotnego pomiaru tego parametru wskazuje na dużą zgodność pomiędzy poszczególnymi pomiarami. Jednak ta zgodność bardziej objawia się w zbliżonym odwzorowaniu trendu zmian wartości przechyłki. Dokładność pomiaru jest nieco mniejsza, co obrazują również wartości statystyczne. Odchylenie standardowe wartości przechyłek zmierzonych toromierzem w kierunku „tam” i „z powrotem” obliczone na całym odcinku różni się o 0,7 mm, natomiast wartość średnia o 1,3 mm. Nieco inna sytuacja jest w przypadku nie-

równości pionowych. Na wykresie trudno dostrzec fragmenty, gdzie wartości nierówności zmierzone przy pomocy niwelatora i toromierza są równe, a trend zmian jest zbliżony tak, jak w przypadku wykresu przechyłek. Pomimo tego, wartości średniej oraz odchylenia standardowego nie różnią się w przypadku obu toków szynowych więcej niż o 0,1 mm.

Istotność różnic pomiędzy pomiarami

Bardziej szczegółowa ocena różnicy pomiędzy poszczególnymi pomiarami wymagała zastosowania testu istotności różnic. Test t dla prób zależnych pozwala na wykorzystanie pewnego specyficznego typu układu eksperymentalnego, w którym ważne źródło zmienności wewnątrzgrupowej (lub tzw. błędu) może zostać łatwo zidentyfikowane i wykluczone z analizy. W szczególności, jeśli dwie grupy obserwacji (które mają zostać

Tab.1. Wartości statystyczne przechyłki

Wartość statystyczna	Rodzaj pomiaru	Wartości dla poszczególnych sekcji					
		Prosta	Rampa przechyłkowa	Łuk kołowy	Rampa przechyłkowa	Prosta	Cały odcinek
Średnia	Niwelator	0,7	-27,3	-49,1	-24,9	1,1	-35,5
	Toromierz I	1,1	-26,6	-49,0	-24,5	1,2	-35,6
	Toromierz II	0,6	-27,5	-49,2	-25,2	0,8	-36,9
Odchylenie standardowe	Niwelator	1,8	15,0	1,5	14,4	0,8	20,9
	Toromierz I	1,6	15,1	1,5	14,1	0,7	20,8
	Toromierz II	1,5	15,0	1,4	14,2	0,7	20,1
Wartość maksymalna	Niwelator	4,7	-3,4	-45,9	-3,4	3,2	4,7
	Toromierz I	4,8	-2,9	-45,6	-3,1	2,6	4,8
	Toromierz II	4,0	-3,7	-46,1	-4,2	1,7	4,0
Wartość minimalna	Niwelator	-3,1	-49,8	-54,9	-49,4	-0,1	-54,9
	Toromierz I	-2,2	-50,0	-53,9	-49,5	0,2	-53,9
	Toromierz II	-2,0	-50,3	-54,0	-49,3	-0,3	-54,0



4. Wykres nierówności pionowych toku lewego



5. Wykres nierówności pionowych toku prawego

Tab.2. Wartości statystyczne nierówności pionowych toku lewego

Wartość statystyczna	Rodzaj pomiaru	Wartości dla poszczególnych sekcji					Cały odcinek
		Prosta	Rampa przechyłkowa	Łuk kołowy	Rampa przechyłkowa	Prosta	
Średnia	Niwelator	-0,1	0,3	0,1	0,0	0,0	0,1
	Toromierz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
Odchylenie standardowe	Niwelator	2,0	2,0	2,0	2,1	1,8	2,0
	Toromierz	1,7	1,6	2,1	2,0	1,7	2,0
Wartość maksymalna	Niwelator	5,4	4,6	8,2	2,6	3,5	8,2
	Toromierz	3,6	4,6	6,8	5,0	4,7	6,8
Wartość minimalna	Niwelator	-5,2	-3,3	-6,0	-4,3	-3,3	-6,0
	Toromierz	-3,7	-3,0	-5,8	-3,6	-2,8	-5,8

Tab.3. Wartości statystyczne nierówności pionowych toku prawego

Wartość statystyczna	Rodzaj pomiaru	Wartości dla poszczególnych sekcji					Cały odcinek
		Prosta	Rampa przechyłkowa	Łuk kołowy	Rampa przechyłkowa	Prosta	
Średnia	Niwelator	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,1	0,0
	Toromierz	0,0	0,1	0,0	0,1	-0,2	0,0
Odchylenie standardowe	Niwelator	1,9	1,2	1,6	1,4	1,6	1,6
	Toromierz	1,6	1,1	1,7	1,4	1,3	1,6
Wartość maksymalna	Niwelator	3,1	1,9	4,3	3,1	2,8	4,3
	Toromierz	4,3	2,7	8,5	3,6	1,5	8,5
Wartość minimalna	Niwelator	-6,0	-2,1	-6,6	-3,1	-2,2	-6,6
	Toromierz	-3,3	-2,0	-5,7	-2,3	-2,3	-5,7

Tab.4. Wartości p dla poszczególnych testów istotności

Wartości p dla przechyłki			Wartości p dla nierówności L i P	
niwelator/ toromierz I	niwelator/ toromierz II	toromierz I/ toromierz II	niwelator/ toromierz	niwelator/ toromierz
0,71	0,96	0,72	0,82	0,92

porównane) zostały oparte na tej samej grupie obiektów zmierzonych dwukrotnie, to wówczas znaczna część zmienności wewnątrzgrupowej w obydwu grupach wyników może zostać przypisana początkowej indywidualnej różnicy pomiędzy obiektami. Założeniem teoretycznym testu t jest takie, że rozpatrywane zmienne powinny mieć rozkład normalny.

Podawany w wynikach testu t poziom istotności p reprezentuje prawdopodobieństwo błędu związanego z przyjęciem hipotezy o istnieniu różnic między średnimi. Decyzja o tym, jaki poziom istotności skłonni jesteśmy uznać za rzeczywiście istotny, jest zawsze podejmowana w sposób arbitralny. W wielu dziedzinach badań jako typową wartość graniczną poziomu istotności przyjmuje się $p \leq 0,05$. Poniżej tej wartości rezultat oceniany jest jako statystycznie istotny. Pamiętaj jednak należy, że wartość ta niesie w sobie dość dużą możliwość popełnienia błędu (5%). Wyniki istotne na poziomie $p \leq 0,01$ uważa się powszechnie za statystycznie istotne, zaś wyniki istotne na poziomie $p \leq 0,005$ lub $p \leq 0,001$ nazywane bywają wysoce istotnymi.

Rozkłady wartości przechyłki i nierówności pionowych przedstawiono na rysunkach 6-8. Dla przechyłki przyjęto wartości odchyłek od wartości nominalnej przechyłki w poszczególnych punktach pomiarowych.

Wszystkie zmierzone parametry mają rozkład o kształcie normalnym. Rozkłady przechyłki są najbardziej asymetryczne. Rozkłady nierówności pionowych zmierzonych niwelatorem i toromierzem są względem siebie symetryczne. Najbardziej smukły jest rozkład nierówności pionowych toku prawego. Świadczy to o małej deformacji tego toku, gdyż 80% wartości z pomiarów nie przekracza 2 mm. Znajduje to swoje potwierdzenie w praktyce, gdyż tok prawy na badanym łuku jest tokiem zewnętrznym, czyli mniej obciążonym.

Po sprawdzeniu normalności rozkładów poszczególnych parametrów, wykonano test istotności różnic. Obliczenia wykonano przy pomocy programu Statistica 9.0. Zestawienie wyników zawiera tabela 4.

Wyniki testu potwierdzają wcześniejsze wnioski. Wartości przechyłki i nierówności pionowych zmierzone niwelatorem oraz toromierzem nie różnią się istotnie. W przypadku przechyłki największa wartość p wystąpiła przy teście dla wartości zmierzonych niwelatorem i toromierzem przy przejeździe „z powrotem”. W przypadku nierówności pionowych, mniej istotne różnice wystąpiły przy pomiarach toku prawego.

Podsumowanie

Analiza porównawcza metod pomiaru nawierzchni kolejowej wykonana na podsta-

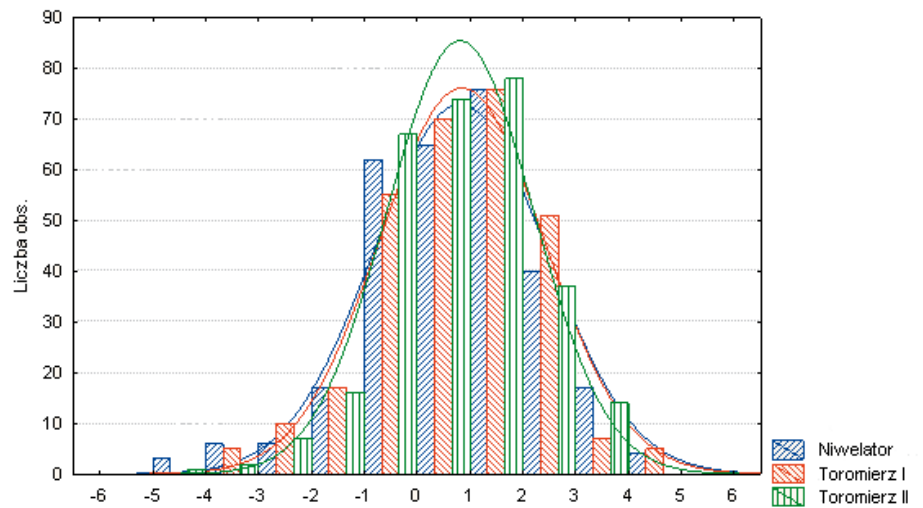
wie wyników pomiarów niwelatorem i toromierzem samorejestrującym wykazała dużą zgodność rezultatów. Wykresy wartości przechyłki cechuje dokładne odwzorowanie trendu zmian. Istnieją natomiast zauważalne różnice wartości mierzonych w poszczególnych punktach pomiarowych.

W przypadku nierówności pionowych różnice są jeszcze bardziej zauważalne, natomiast wartość średnia i odchylenie standardowe na całym odcinku pomiarowym są niemalże identyczne przy zastosowaniu obydwu metod.

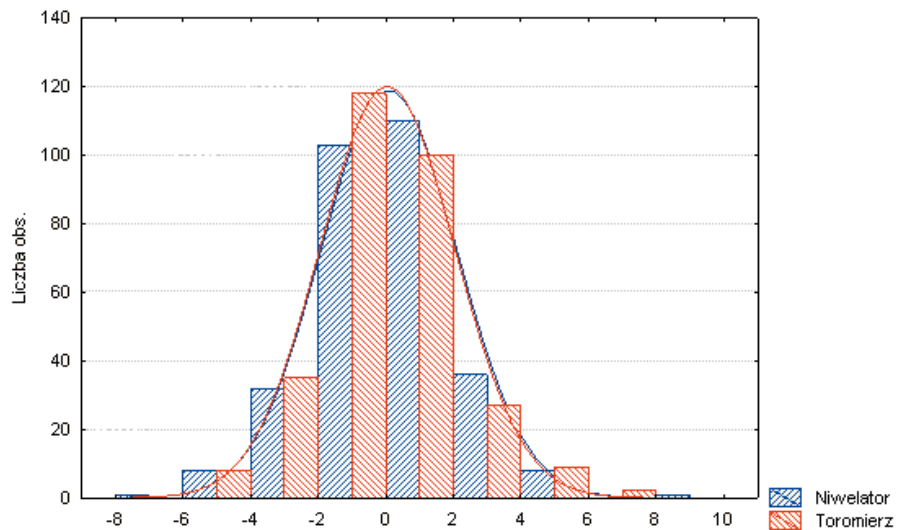
Pomiar toromierzem samorejestrującym jest wystarczająco dokładną metodą pomiaru nawierzchni kolejowej stosowaną przy ocenie jakości geometrycznej toru w celu odbioru robót. Ze względu na fakt, że wartości nierówności mierzone toromierzem w poszczególnych punktach oraz ich znak nie zawsze były zgodne z wartością zmierzoną niwelatorem, decyzję o naprawach ewentualnych usterek należy podejmować na podstawie pomiarów niwelatorem. ◀

Materiały źródłowe:

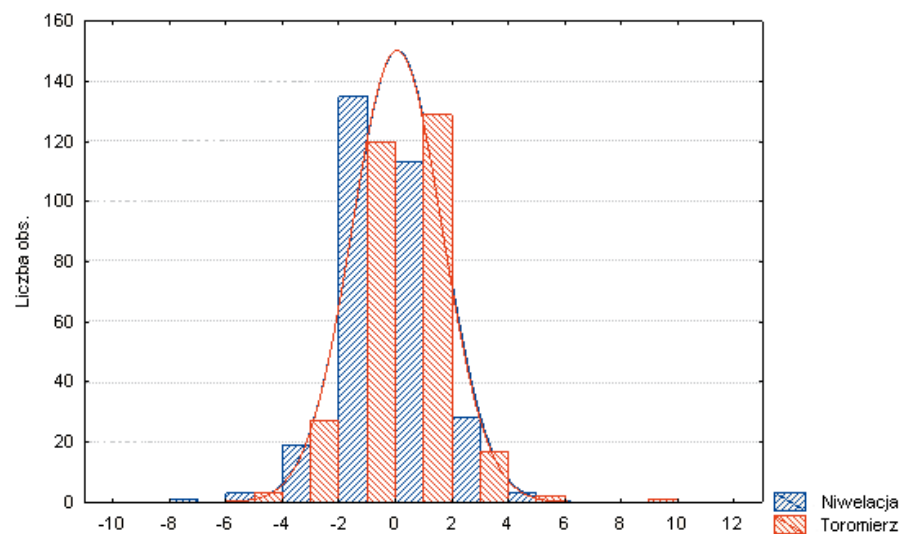
- [1] Id-1 (D1) – Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych. Zarządzenie Zarządu PKP PLK S.A. Nr 14 z dnia 18 maja 2005 r. w sprawie wprowadzenia „Warunków technicznych utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych Id-1 (D-1)”. Biuletyn PKP PLK S.A., Załącznik B nr 02 z dnia 10 czerwca 2005 r., poz. 15 z późniejszymi zmianami;
- [2] Elektroniczny Podręcznik Statystyki PL, Kraków, WEB: <http://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html>, StatSoft 2006;



6. Rozkłady przechyłki mierzonej niwelatorem oraz dwukrotnie toromierzem



7. Rozkłady nierówności pionowych toku lewego mierzonych niwelatorem i toromierzem



8. Rozkłady nierówności pionowych toku prawego mierzonych niwelatorem i toromierzem