

SYNTETYCZNE WSKAŹNIKI OCENY STANU TORU

Zbigniew Kędra

dr inż., Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, Katedra Transportu Szynowego i Mostów, tel.: +48 58 348 60 91, e-mail: kedra@pg.gda.pl

Streszczenie. *Jakość geometryczna toru analizowana jest w różnych celach, a dane podlegają różnemu stopniowi agregacji. Pojedyncze nierówności toru analizowane są zazwyczaj z uwagi na bezpieczeństwo i służą do planowania napraw w krótkich terminach. Natomiast agregacja pomierzonych parametrów pozwala na planowanie robót w terminach średniookresowych i budowę modeli predykcji. W artykule przedstawiono zagregowane wskaźniki jakości geometrycznej toru, które spełniają wymogi normy PN-EN 13848-6 oraz przykłady ich obliczeń.*

Słowa kluczowe: *drogi kolejowe, diagnostyka dróg kolejowych, jakość geometryczna toru*

1. Wstęp

W celu ujednoczenia zasad oceny stanu geometrii toru na europejskiej sieci kolejowej, konieczne było wprowadzenie minimalnych wymagań w zakresie charakterystyki podstawowych parametrów i metod ich pomiaru. Głównymi dokumentami opisującym tą problematykę są: Techniczna Specyfikacja Interoperacyjności dla podsystemu Infrastruktura [2] oraz normy powiązane serii PN-EN 13848 [7-12] i PN-EN 14363 [6].

Jakość geometryczna toru może być analizowana w różnych celach, co sprawia, że w zależności od potrzeby, dane mogą podlegać różnemu stopniowi agregacji. W procesie utrzymania linii kolejowych można wyróżnić trzy poziomy agregacji podstawowych parametrów opisujących geometrię toru (nierówności pionowe i poziome, szerokość toru, przechyłkę i wichrowatość) [4, 12]:

- szczegółowy,
- pośredni,
- poglądowy.

Na poziomie szczegółowym analizowane są pojedyncze nierówności toru, które mogą stanowić zagrożenie dla bezpieczeństwa ruchu pojazdów szynowych [4]. W tym celu oceniane są podstawowe parametry opisujące geometrię toru:

- nierówności pionowe D1 (zakres długości fal $3 \div 25$ m),
- nierówności poziome D1 (zakres długości fal $3 \div 25$ m),

- wichrowatość,
- szerokość toru,
- przechyłka,

które zostały pomierzone zgodnie z normą PN-EN 13848-1 [7].

Maksymalne wartości pomierzonych parametrów (pojedyncze nierówności toru) porównuje się z przyjętymi przez zarządcę infrastruktury wartościami dopuszczalnymi (granica czujności, działań planowanych i bezpośrednich [1]).

Poziom pośredni obejmuje analizę wskaźników (rekomendowane są odchylenia standardowe nierówności pionowych i poziomych) w celu podjęcia decyzji w zakresie planowania napraw średniookresowych i badania właściwości dynamicznych pojazdów. Analiza obejmuje najczęściej odcinki toru o długości 200 m.

Na poziomie pogładowym obliczane są wskaźniki jakości toru (dystybuanty rozkładu częstości odchyżeń standardowych, oddzielnie dla nierówności pionowych i poziomych), które analizowane są w celu podejmowania decyzji strategicznych. Analizy wykonywane są dla poszczególnych linii kolejowych i wykorzystywane przez właściciela infrastruktury do zarządzania siecią kolejową i planowania długoterminowego.

Zaleca się, aby ocena stanu geometrycznego toru wykonana była przy wykorzystaniu kilku wskaźników TQI (*Track Quality Index*) na różnych poziomach ich agregacji, przy jednoczesnym założeniu, że algorytmy obliczeń i metody wnioskowania są jasne i zrozumiałe dla użytkownika. Ocena ta powinna również odzwierciedlać interakcję tor-pojazd (np. nierówności o tej samej amplitudzie i różnych długościach fal będą prowadziły do różnych zachowań pojazdu).

2. Odchylenia standardowe

Podstawowym (referencyjnym) wskaźnikiem oceny stanu geometrii toru na poziomie pośrednim jest odchylenie standardowe, które jest klasyczną miarą zmienności. Obliczane jest zazwyczaj dla wszystkich parametrów opisujących geometrię toru na długości 200 m (w Polsce 1000 m) z następującego wyrażenia:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (1)$$

gdzie:

N – liczba pomiarów na analizowanym odcinku toru,

x_i – wartość i -tego pomiaru,

\bar{x} – wartość średnia N pomiarów.

Odchylenie standardowe nierówności pionowych i poziomych powinno być obliczone oddzielnie dla każdego toku szynowego. W zależności od konstrukcji wskaźnika jakości toru i sposobu jego wykorzystania, odchylenie standardowe może być wyznaczane jako:

- średnia arytmetyczna (z toku lewego i prawego) w celu obliczenia wskaźnika syntetycznego lub budowy modelu predykcji i planowania napraw,
- wartość maksymalna (z dwóch toków szynowych) lub wartość z toku zewnętrzznego na łuku i krzywych przejściowych przy badaniach właściwości dynamicznych pojazdów szynowych.

Przy analizie odchylenia standardowego można również rozróżnić poszczególne odcinki toru z uwagi na jego geometrię (proste i łuki z krzywymi przejściowymi) oraz konstrukcję nawierzchni (rozjazdy i obiekty inżynierskie).

Dopuszczalne wartości odchylenia standardowego nierówności pionowych i poziomych dla granicy czułości i zakresu długości fal D1 ($3 \div 25$ m) zapisane zostały w normie PN-EN 13848-5 [11]. Wartości te podane zostały w pewnych zakresach (tab. 1), a zarządca infrastruktury kolejowej w zależności od przyjętej strategii utrzymania zapisuje je w planie utrzymania [13].

Tabela 1. Odchylenia standardowe nierówności pionowych D1 – granicy czułości AL [11]

Prędkość [km/h]	Odchylenie standardowe zakresu długości fal D1 [mm]
$V \leq 80$	2,3÷3,0
$80 < V \leq 120$	1,8÷2,7
$120 < V \leq 160$	1,4÷2,4
$160 < V \leq 230$	1,2÷1,9
$230 < V \leq 300$	1,0÷1,5

Strategia utrzymania torów kolejowych może być ukierunkowana na bezpieczeństwo lub spokojność jazdy oraz niższy koszt cyklu życia lub wyższe prędkości jazdy. Odchyłki te zapewniają bezpieczeństwo (większe wartości) i mogą być również stosowane do osiągnięcia odpowiedniego poziomu spokojności jazdy (wartości mniejsze).

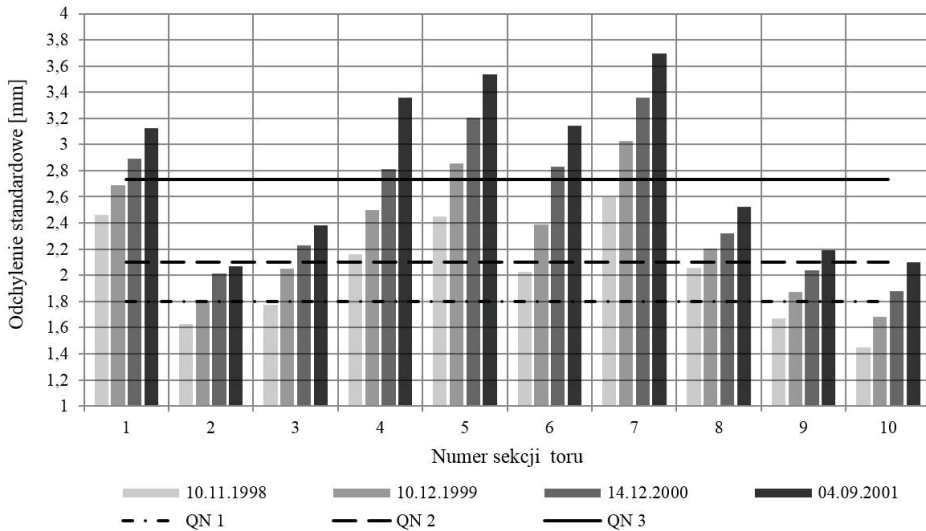
W normie PN-EN 14363 [6] dotyczącej badania właściwości dynamicznych pojazdów szynowych przed dopuszczeniem do ruchu, poziom jakości geometrii toru oparty został na trzech kryteriach utrzymania QN1, QN2 i QN3.

W tabeli 2 przedstawiono dopuszczalne wartości odchylenia standardowego nierówności pionowych dla poziomu jakości QN, przy czym wartości $QN3 = 1,3 \times QN2$. Odnoszą się one do rzeczywistego stanu toru (reprezentatywnych linii), z uwzględnieniem odchyłek nierówności toru, które zostały ustalone zgodnie z zasadami utrzymania wynikającymi z wiedzy i dobrej praktyki.

Tabela 2. Odchylenia standardowe nierówności pionowych D1 [6]

Prędkość [km/h]	Odchylenia standardowe D1 [mm]		
	QN1	QN2	QN3
$V \leq 80$	2,3	2,6	3,4
$80 < V \leq 120$	1,8	2,1	2,7
$120 < V \leq 160$	1,4	1,7	2,2
$160 < V \leq 200$	1,2	1,5	2,0
$200 < V \leq 300$	1,0	1,3	1,7

Na rys. 1 przedstawiono przykładowy wykres odchyłeń standardowych obliczonych na odcinkach toru (sekcjach) o długości 200 m. Pomiary strzałek w płaszczyźnie pionowej wykonane zostały drezyną pomiarową EM-120 w czterech kolejnych latach.



Rys. 1. Odchylenia standardowe pomierzonych strzałek w płaszczyźnie pionowej

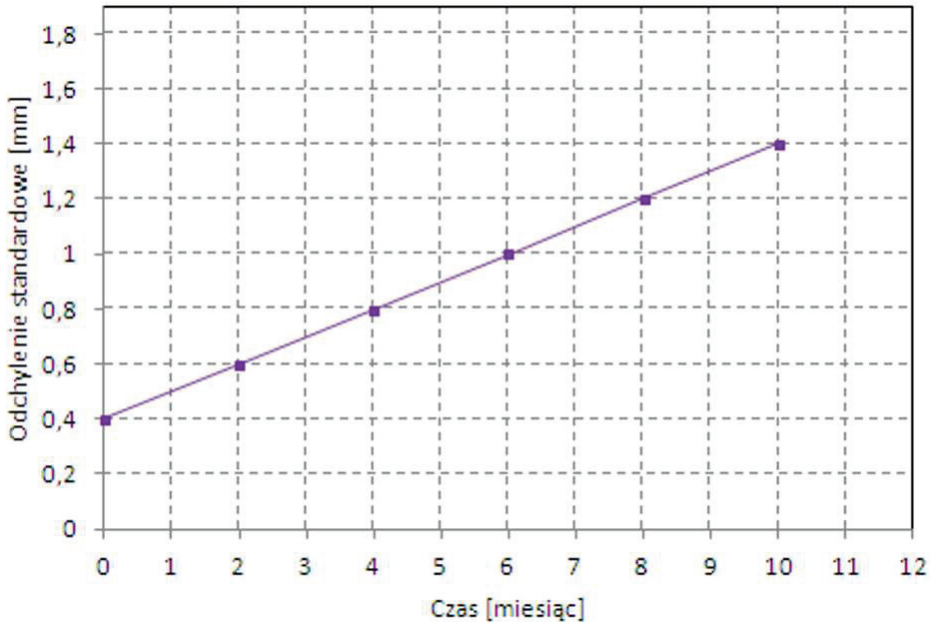
Źródło: opracowanie własne

Na wykresie odchyłeń standardowych pomierzonych strzałek (rys. 1) zaznaczono wartości graniczne QN trzech poziomów jakości geometrycznej toru dla zakresu prędkości $80 < V \leq 120$ km/h, gdzie [6]:

- poziom QN1 – charakteryzuje odcinki toru, które wymagają oceny stanu i podejmowania decyzji w zakresie normalnego utrzymania (planowania napraw średniookresowych),
- poziom QN2 – charakteryzuje odcinki toru, które wymagają podejmowania decyzji w zakresie napraw krótkotrwałych,
- poziom QN3 – charakteryzujący odcinki toru, które nie odzwierciedlają zalecanego poziomu jakości toru (zgodnego ze stanem wiedzy i dobrą praktyką), ale jest to jeszcze stan dopuszczalny.

Należy zauważyć, że na pięciu odcinkach odchylenie standardowe jest większe od dopuszczalnego poziomu QN3 (rys. 1), co wskazuje na przekroczenie terminu naprawy, konieczność miejscowego ograniczenia prędkości i szybszą degradację toru.

Odchylenia standardowe nierówności pionowych i poziomych wykorzystywane są również do budowy modelu predykcji. Modele te powinny pozwalać na estymację i prognozowanie stanu infrastruktury w funkcji czasu lub obciążenia. W praktyce do oceny jakości geometrii toru najczęściej stosowane są modele liniowe (rys. 2) lub wykładnicze [5].



Rys. 2. Model liniowy oceny jakości geometrii toru

Źródło: opracowanie własne

3. Wadliwość

Pojedyncze nierówności toru mogą stanowić zagrożenie dla bezpieczeństwa pojazdu kolejowego, ale obliczenie liczby tych przekroczeń dla granicy czułości i działań planowanych na stałej długości toru może być wartością reprezentatywną i wykorzystaną jako wskaźnik jakości geometrycznej. Metoda ta stosowana jest przez niektórych zarządców europejskiej sieci kolejowej, a wskaźnik liczony jest zazwyczaj na długości 1000 m.

Przykładem takiego wskaźnika w Polsce jest wadliwość, która obliczana jest z wzoru:

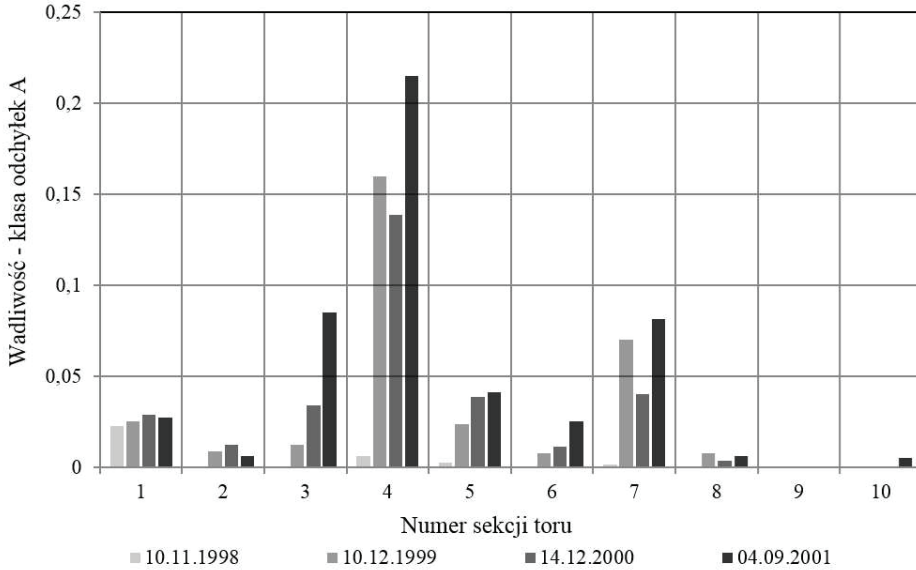
$$w = \frac{N_p}{N} \quad (2)$$

gdzie:

N_p – liczba pomiarów przekraczająca wartość odchyłki na analizowanym odcinku,

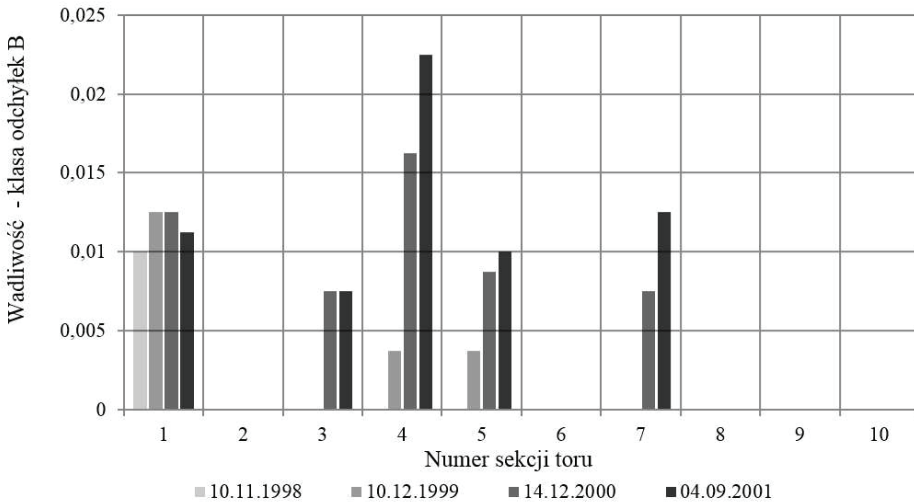
N – liczba pomiarów na analizowanym odcinku.

Na rys. 3 i 4 przedstawiono przykładowe wykresy wadliwości pomierzonych strzałek w płaszczyźnie pionowej dla odchyłek klasy A i B ($V=100$ km/h [2, 15]) na dziesięciu odcinkach toru o długości 200 m.



Rys. 3. Wadliwość nierówności pionowych dla odchyłki klasy A (50% odchyłki C)

Źródło: opracowanie własne



Rys. 4. Wadliwość nierówności pionowych dla odchyłki klasy B (75% odchyłki C)

Źródło: opracowanie własne

W praktyce wadliwość może być obliczona dla granicy czujności i działań planowanych, a wartości dopuszczalne należy przyjmować według normy PN-EN 14363 [6].

4. Wskaźnik FRA TQI

Koleje amerykańskie do oceny stanu torów wykorzystują wskaźnik FRA TQI wyrażony wzorem [3, 16]:

$$TQI = \left(\frac{L_s}{L_o} - 1 \right) \cdot 10^6 \quad (3)$$

gdzie:

L_s – długość krzywej pomierzonych nierówności toru,
 L_o – teoretyczna długość odcinka toru.

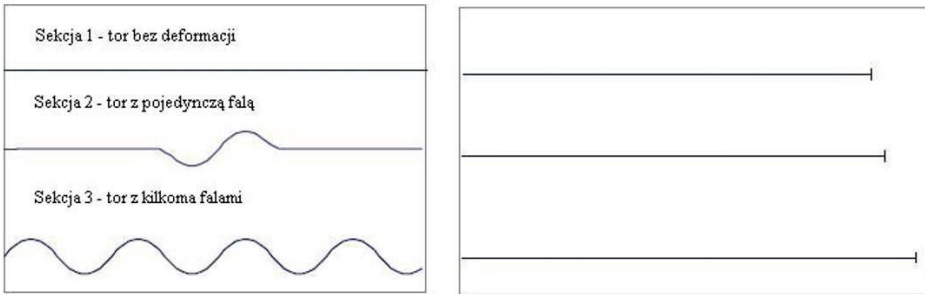
Wartość wskaźnika TQI obliczana jest dla odcinka toru o długości 528 stóp (160,9 m), co stanowi jedną dziesiątą mili. Długość krzywej pomierzonych nierówności oblicza się jako sumę prostoliniowych odcinków pomiędzy dwoma kolejnymi punktami pomiarowymi na podstawie zależności [16]:

$$L_s = \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta y_i^2 + \Delta x_i^2} \quad (4)$$

gdzie:

Δx – odległość pomiędzy pomiarami,
 Δy – różnica dwóch kolejnych pomiarów.

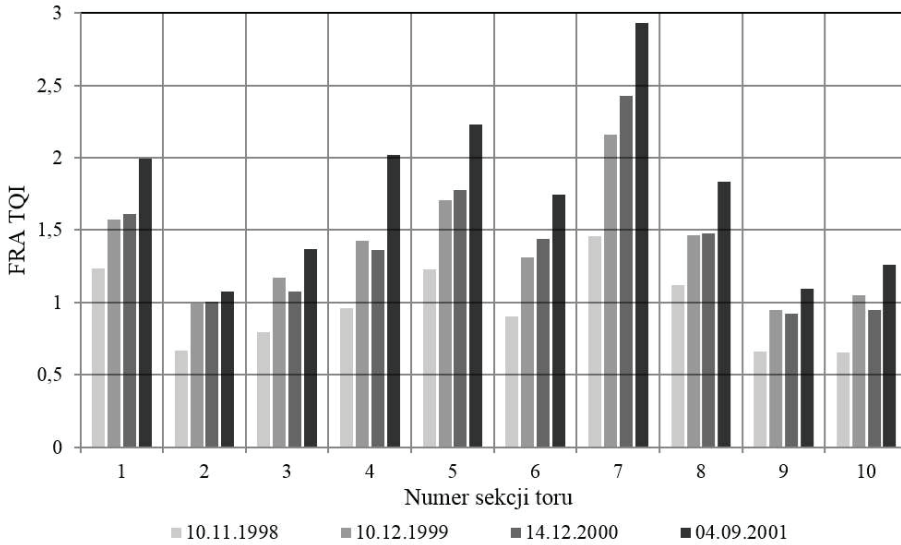
W przypadku toru bez deformacji, długość teoretyczna równa jest długości pomierzonych nierówności, a zatem wartość TQI równa się zero. Zwiększenie deformacji toru powoduje wydłużenie krzywej pomierzonych nierówności, co zwiększa wartość wskaźnika TQI (rys. 5).



Rys. 5. Idea wskaźnika FRA TQI: kształt deformacji – z lewej, długość krzywej pomierzonych nierówności – z prawej

Źródło: [16]

Na rys. 6 przedstawiono przykładowy wykres wskaźników FRA TQI dla kolejnych czterech pomiarów strzałek pionowych, które obliczono na dziesięciu odcinkach toru o długości równej 200 m.



Rys. 6. Wykres wskaźnika FRA TQI dla strzałek pionowych

Źródło: opracowanie własne

5. Wskaźniki scalone

Ocena syntetyczna jakości odcinka toru (np. 200 m, 1000 m) może być również wykonana poprzez połączenie ważonych odchyłek standardowych poszczególnych parametrów. Ogólny przykład takiego TQI podano w normie PN-EN 13848-6[12]:

$$CoSD = \sqrt{w_{\overline{AL}}SD_{\overline{AL}}^2 + w_GSD_G^2 + w_{CL}SD_{CL}^2 + w_{\overline{LL}}SD_{\overline{LL}}^2} \quad (5)$$

gdzie:

- SD – odchylenie standardowe nierówności toru,
- w – współczynniki korygujący (określa zarządca infrastruktury),
- \overline{AL} – nierówności poziome (średnia z toku lewego i prawego),
- G – odchyłka szerokość toru,
- CL – odchyłka przechyłki,
- \overline{LL} – nierówności pionowe (średnia z toku lewego i prawego).

Scalony wskaźnik jakości geometrycznej może być również obliczony jako średnia ważona z wybranych odchyłek standardowych. W Polsce syntetyczny wskaźnik jakości toru J obliczany jest z wyrażenia [2, 15]:

$$J = \frac{S_z + S_y + S_w + 0,5S_e}{3,5} \quad (6)$$

gdzie:

- S_z – odchylenie standardowe strzałek pionowych,

S_y – odchylenie standardowe strzałek poziomych,
 S_w – odchylenie standardowe wichrowatości toru,
 S_e – odchylenie standardowe szerokości toru.

Na linii Gautrain w RPA, która łączy w sobie cechy metra i kolei podmiejskiej obliczany jest wskaźnik jakości toru TQI z wyrażenia [14]:

$$TQI = 0,3\sigma_{LL} + 0,3\sigma_{AL} + 0,2\sigma_T + 0,1\sigma_{CL} + 0,1\sigma_G \quad (7)$$

gdzie:

σ – odchylenia standardowe – odpowiednio strzałek pionowych, poziomych, wichrowatości, przechyłki i szerokości toru.

Do oceny stanu toru mogą być również wykorzystane wskaźniki obliczane jako odchylenie standardowe kombinacji parametrów geometrycznych. Takie podejście opiera się na obserwacji, że połączenie pewnych parametrów (np. nierówności poziomych i przechyłki) może lepiej odzwierciedlać zachowanie się pojazdu, niż pojedyncze parametry.

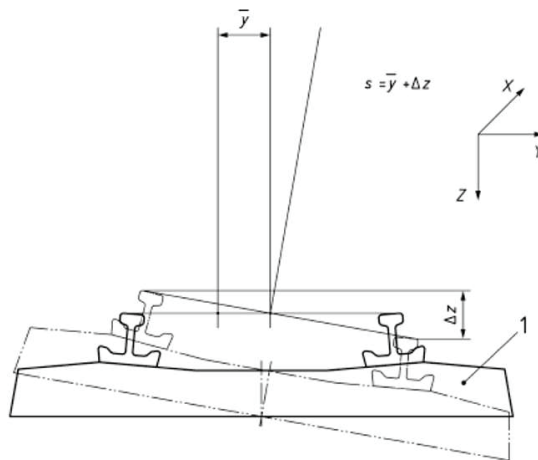
Odchylenie standardowe kombinacji parametrów powszechnie obliczane jest dla nierówności pionowych i poziomych jako średnia arytmetyczna lub wybierana jest wartość maksymalna do wyznaczenia wskaźnika syntetycznego.

Przykładem kombinacji parametrów jest również połączenie nierówności poziomych i przechyłki (rys. 7) z uwzględnieniem ich znaku [12]:

$$s = \bar{y} + \Delta z \quad (8)$$

gdzie:

s – suma przechyłki i nierówności poziomych,
 - średnia nierówności poziomych z dwóch toków szynowych,
 Δz – przechyłka.



Rys. 7. Schemat wyznaczania wskaźnika z nierówności poziomych i przechyłki: 1 – tor bez przechyłki

Źródło: [12]

Przykładem wskaźników wykorzystujących kombinację pomierzonych wartości strzałek poziomych i przechyłki mogą być również obliczone wielkości kinematyczne. W tym celu należy wykonać transformację pomierzonych nierówności toru na przyspieszenia i ich przyrost. Wartości te oblicza się dla pojazdu szynowego, który traktuje się jako punkt materialny.

Niezrównoważone przyspieszenie w dowolnym punkcie pomiarowym można obliczyć z wyrażenia przedstawionego w pracy [1]:

$$a = 6,17 \cdot 10^{-4} \frac{V^2 F}{c^2} - 6,54 \cdot 10^{-3} h \quad (9)$$

gdzie:

a – niezrównoważone przyspieszenie [m/s^2],

V – prędkość [km/h],

F – strzałka pozioma [mm],

c – długość cięciwy [m],

h – przechyłka [m].

Na podstawie pomierzonych strzałek poziomych i przechyłki możemy również ocenić zmianę przyspieszenia w czasie. Wartość przyrostu przyspieszenia na krótkim odcinku toru obliczymy wówczas z wyrażenia [1]:

$$\Psi = \frac{3,43 \cdot 10^{-4} V^3}{c^3} (F_i - F_{i+1}) - \frac{V(h_i - h_{i+1})}{550c} \quad (10)$$

gdzie:

Ψ – przyrost przyspieszenia [m/s^3],

$F_i - F_{i+1}$ – różnica strzałek [mm],

$h_i - h_{i+1}$ – różnica przechyłek [mm].

6. Wnioski

Ocena stanu geometrii toru powinna być wykonana na podstawie kilku wskaźników na różnych poziomach ich agregacji, przy jednoczesnym założeniu, że algorytmy obliczeń i metody wnioskowania są jasne i zrozumiałe dla użytkownika.

Na poziomie szczegółowym należy ocenić pojedyncze nierówności toru, które mogą stanowić zagrożenie dla bezpieczeństwa ruchu pojazdów szynowych. Maksymalne wartości pomierzonych parametrów porównuje się z przyjętymi przez zarządcę infrastruktury wartościami dopuszczalnymi (granica czujności, działań planowanych i bezpośrednich). Na tej podstawie planowane są i wykonywane naprawy krótkookresowe na krótkich odcinkach.

Na poziomie pośrednim rekomendowana jest analiza odchyień standardowych nierówności pionowych i poziomych w celu podjęcia decyzji w zakresie planowania napraw średniokresowych. Obliczone odchylenia standardowe na odcinkach

200 m mogą być porównane z granicami QN i na tej podstawie powinny być planowane naprawy średniookresowe na dłuższych odcinkach torów (nawet na całym szlaku).

Na poziomie pogładowym analizowane są dystrybuanty rozkładu częstości odchyień standardowych, oddzielnie dla nierówności pionowych i poziomych, w celu podjęcia decyzji strategicznych. Analizy wykonywane są dla całych linii kolejowych i wykorzystywane przez właściciela infrastruktury do zarządzania siecią kolejową i planowania długoterminowego.

Bibliografia

- [1] Bałuch H., Bałuch M., Determinanty prędkości pociągów – układ geometryczny i wady toru. Instytut Kolejnictwa, Warszawa 2010.
- [2] Instrukcja o dokonywaniu pomiarów, badań i oceny stanu torów Id-14 (D-75). PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Zarządzenie Nr 26 Zarządu PKP PLK S.A. z dnia 12.07.2005 r.
- [3] Development of Objective Track Quality Indices. US Department of Transportation Federal Railroad Administration. RR05-01, 2005, www.fra.dot.gov/Elilib/Document/2146 (10.02.2015).
- [4] Kędra Z., Analiza pojedynczych nierówności toru. VII Konferencja Naukowo-Techniczna „Projektowanie, budowa i utrzymanie Infrastruktury w transporcie szynowym” INFRASZYN 2014, Zakopane 09-11.04.2013.
- [5] Kędra Z., Ekonomiczne aspekty strategii utrzymania torów kolejowych. *Logistyka* 3/2014, s.2862-2869.
- [6] PN-EN 14363: Kolejnictwo. Badania właściwości dynamicznych pojazdów szynowych przed dopuszczeniem do ruchu. Badanie właściwości biegowych i próby stacjonarne.
- [7] PN-EN 13848-1: Kolejnictwo. Tor. Jakość geometryczna toru. Część 1: Charakterystyka geometrii toru.
- [8] PN-EN 13848-2: Kolejnictwo. Tor. Jakość geometryczna toru. Część 2: Systemy pomiarowe. Pojazdy do pomiaru toru.
- [9] PN-EN 13848-3: Kolejnictwo. Tor. Jakość geometryczna toru. Część 3: Systemy pomiarowe. Maszyny do budowy i utrzymania toru.
- [10] PN-EN 13848-4: Kolejnictwo. Tor. Jakość geometryczna toru. Część 4: Systemy pomiarowe. Urządzenia lekkie i ręczne.
- [11] PN-EN 13848-5: Kolejnictwo. Tor. Jakość geometryczna toru. Część 5: Poziom jakości geometrycznej. Szlak.
- [12] PN-EN 13848-6: Kolejnictwo. Tor. Jakość geometryczna toru. Część 6: Charakterystyka jakości geometrycznej toru.
- [13] Rozporządzenie Komisji (UE) Nr 1299/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. dotyczące technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Infrastruktura” systemu kolei w Unii Europejskiej.

-
- [14] Van der Westhuizen J., Powell A., Gräbe H., Gautrain State of Good Repair: three years after the first trains were commissioned. *Civil Engineering* May 2013, s.13-17, www.saice.org.za/downloads/monthly_publications/2013/2013-Civil-Engineering-May (06.03.2015).
- [15] Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych Id-1 (D1). PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Zarządzenie Nr 14 Zarządu PKP PLK S.A. z dnia 18.05.2005 r. Biuletyn PKP PLK S.A. Nr 02 z dnia 10.06.2005 r. poz. 15.
- [16] Zhang Y.J., El-Sibaie M., Lee S., FRA Track Quality Indices and Probability Distribution Characteristics. AREAM Annual Conference, September 19-22, 2004, Nashville, TN, www.arena.org/files/library/2004_Conference_Proceedings/00026.pdf (16.02.2015).