

METODY POMIARU I ANALIZY NIERÓWNOŚCI PIONOWYCH 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

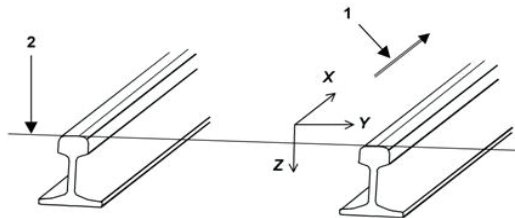
Streszczenie. Do czasu wprowadzenia jednolitych zasad oceny stanu infrastruktury na europejskiej sieci kolejowej zarządy krajowe stosowały różne metody pomiaru, analizy i oceny pomierzonych nierówności toru. Minimalne wymagania w tym zakresie opisane zostały w technicznej specyfikacji interoperacyjności systemu infrastruktura i normach powiązanych. W artykule przedstawiono metody pomiaru i analizy nierówności pionowych spełniające wymagania norm serii PN-EN 13848 oraz zdefiniowano i wyjaśniono podstawowe pojęcia w tym zakresie.

Słowa kluczowe: diagnostyka dróg kolejowych, ocena stanu toru, nierówności pionowe toru.

1. Wstęp

Do oceny rzeczywistego kształtu toru kolejowego w płaszczyźnie pionowej wykorzystuje się metody geodezyjne. Najczęściej jest to niwelacja geometryczna lub pomiary tachymetryczne z wykorzystaniem kolejowej osnowy specjalnej, tj. znaków regulacji osi toru umieszczonych na słupach trakcyjnych. Pomiary te pozwalają na obliczenie rzeczywistego odkształcenia toru względem niwelety teoretycznej i są wykorzystywane głównie w procesie regulacji osi toru kolejowego.

W praktyce diagnostycznej do oceny odkształcenia toru wykorzystuje się układ względny, który jest powiązany z osią toru (rys. 1). Otrzymujemy wówczas względne odkształcenie toków szynowych, które nie może być utożsamienie z rzeczywistym kształtem toru w płaszczyźnie pionowej. Przyczyną tego są stosowane obecnie systemy pomiarowe, które pozwalają na odwzorowanie kształtu toru tylko do określonej długości fal [4].



Rys. 1. Względny układ współrzędnych {6}: 1 – kierunek ruchu, 2 – powierzchnia toczna

Zródło: opracowanie własne na podstawie [6]

W procesie utrzymania nawierzchni kolejowej szczególnie znaczenie mają nierówności pionowe i ich odchylenia standardowe, które wykorzystywane są do planowania napraw w okresie krótko i średnioterminowym [3].

Nierówności toru w płaszczyźnie pionowej najczęściej klasyfikuje się z uwagi na długość fali odkształcenia, którą można łączyć z przyczyną deformacji toru. Krótkie nierówności o długości fal do 1 m związane są głównie z zużyciem falistym powierzchni tocznej główki szyny. Deformacje o długościach fal w zakresie $1 \div 3$ m są najczęściej wynikiem wad powstałych w procesie ich produkcji, transportu oraz układania i łączenia szyn w torze. Nierównomierne odkształcenia podsypki i podtorza wzdłuż toru jest wynikiem zróżnicowanych cech dynamicznych nawierzchni, co powoduje odkształcenia toru o długości fal $3 \div 25$ m. Natomiast odkształcenia toru o długości fal $25 \div 70$ m analizuje się z uwagi na spokojność jazdy i są one wynikiem błędów popełnianych przy tyczeniu niwelety toru i łuków zaokrąglających załomy oraz budowie i naprawach nawierzchni kolejowej. Zakres długości fal $70 \div 150$ m wykorzystywany jest wyłącznie na liniach o prędkości większej od 250 km/h [1,4,12,13].

W celu ujednoczenia zasad oceny stanu geometrii toru na europejskiej sieci kolejowej, konieczne było wprowadzenie minimalnych wymagań w zakresie charakterystyki podstawowych parametrów oraz metod ich pomiaru i analizy. Głównymi dokumentami opisującym tą problematykę są Techniczna Specyfikacja Interoperacyjności dla podsystemu Infrastruktura [12] oraz normy powiązane serii PN-EN 13848 [6-11] i PN-EN 14363 [5].

2. Podstawowe pojęcia i ich definicje

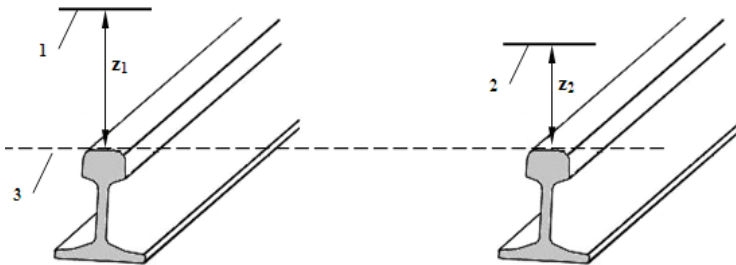
W literaturze [1,4,13,15], normach [5-11] i instrukcjach [2,14] spotkać można różne określenia dotyczące nierówności podłużnych toru w płaszczyźnie pionowej, które bardzo często używane są zamiennie i błędnie porównywane między sobą. Jest to wynikiem stosowania przez zarządców infrastruktury systemów pomiarowych, które różnią się między sobą sposobem, odwzorowaniem rzeczywistych nierówności toru.

Norma PN-EN 13848-1 [6] definiuje nierówności pionowe jako odchylenie z_i w kierunku osi z kolejnych poziomów powierzchni tocznej główki szyny względem średniego położenia w pionie (linii odniesienia), obejmujące wyszczególnione zakresy długości fal i obliczane z następujących po sobie pomiarów (rys. 2).

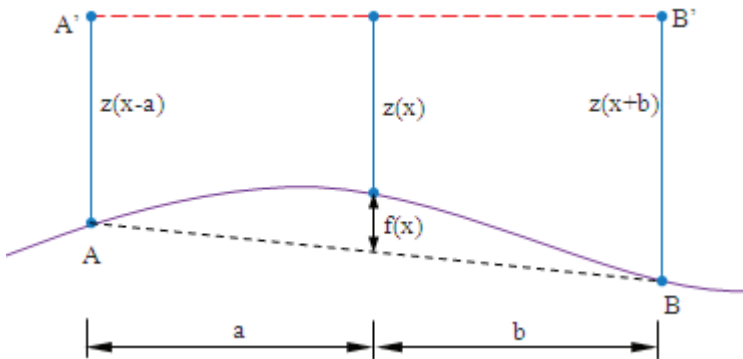
Średnie położenie w pionie (linię odniesienia) uzyskuje się poprzez filtrowanie pomierzonych nierówności filtrem dolnoprzepustowym o określonej długości fali odcięcia, oddzielnie dla każdego toku szynowego.

Strzałki pionowe są to odchylenia $f(x)$ mierzone od powierzchni tocznej główki szyny do linii odniesienia, którą jest cięciwa o podziale asymetrycznym lub symetrycznym (rys. 3). W przypadku systemu kontaktowego linię odniesienia (cięciwę) wyznaczają dwa koła pojazdu pomiarowego oddalone od siebie o długość bazy

pomiarowej (np. drezyna EM120 – cięciwa symetryczna o długości bazy 10 m), a w systemach bezkontaktowych sztywna rama pojazdu, do której podwieszono są urządzenia pomiarowe (np. pojazd UPS-80 – cięciwa asymetryczna o długości bazy 10,3 m).



Rys. 2. nierówności pionowe: 1 – linia odniesienia dla toku lewego; 2 – linia odniesienia dla toku prawego; 3 – powierzchnia toczna
Źródło: opracowanie własne na podstawie [6]



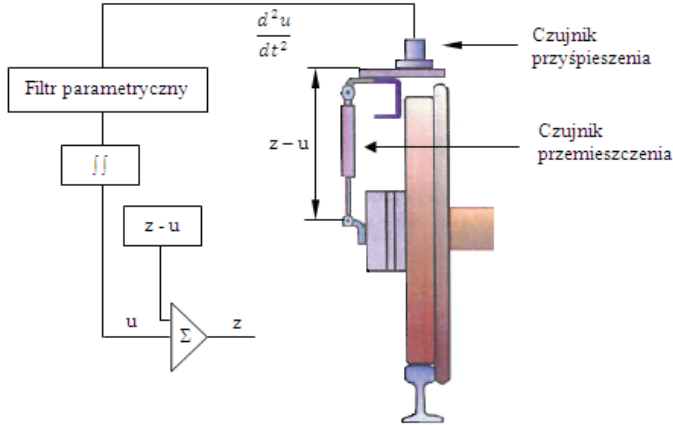
Rys. 3. Schemat wyznaczenia strzałek pionowych
Źródło: opracowanie własne

3. Metody pomiaru nierówności pionowych

Zgodnie z normą PN-EN 13848-1 [6] nierówności pionowe powinny być mierzone metodą inercyjną lub cięciwową (zaleca się aby była asymetryczna) albo systemem będącym kombinacją obu metod. W przypadku zastosowania metody cięciwowej niezbędne jest przefiltrowanie pomierzonego sygnału w celu wyeliminowania wpływu funkcji przejścia. Systemy pomiarowe instalowane na pojazdach pomiarowych, maszynach torowych lub ręcznych wózkach pomiarowych muszą spełniać wymagania opisane w normach [7,8,9].

Metoda inercyjna polega na pomiarze przyspieszeń i przemieszczeń określonego punktu wagonu. Inercyjną linię odniesienia uzyskuje się poprzez dwukrotne całkowanie sygnałów przyspieszeń oddzielnie dla toku lewego i prawego, a następ-

nie odjęcie uzyskanych wartości od zmierzonych przemieszczeń (rys. 4). Początkowo metoda ta była stosowana w wagonach pomiarowych kolej holenderskich oraz brytyjskich i umożliwiała odwzorowanie nierówności pionowych w zakresie długości fal $0,5 \div 25$ m oraz $0,5 \div 70$ m [13].



Rys. 4. Schemat kontaktowego układu do pomiaru nierówności pionowych
Źródło: [13,15]



Rys. 5. Inercyjny system pomiaru nierówności toru
Źródło: materiały informacyjne firmy MER MEC S.p.A. [16]

Obecnie częściej stosowane są bezkontaktowe systemy inercyjne, które charakteryzuje modułowa budowa i możliwość mocowania do ramy podwozia pojazdu. Systemy te umożliwiają pomiar nierówności toru z dużymi prędkościami, nawet do 400 km/h [16].

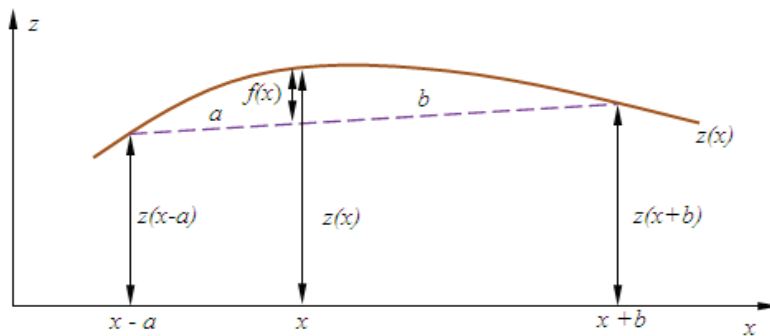
Podobnie jest w przypadku metody cięciwowej, systemy kontaktowego pomiaru nierówności toru (np. stosowany na drezynie EM-120) zastępowane są przez modułowe systemy bezkontaktowego (rys. 6).



Rys. 6. Cięciwowy system pomiarowy nierówności toru

Źródło: materiały informacyjne firmy MER MEC S.p.A. [16]

W systemach cięciwowych wartości strzałek pionowych $f(x)$ obliczane są na podstawie pomierzonych odległości między czujnikami optycznymi i powierzchnią toczną główki szyny w trzech punktach, które tworzą asymetryczną cięciwę pomiarową (rys. 7).



Rys. 7. Schemat wyznaczenia strzałki pionowej – cięciwa asymetryczna

Źródło opracowanie własne

Strzałki pionowe $f(x)$ cięciwowego (asymetrycznego) systemu pomiarowego mogą być obliczane z wyrażenia:

$$f(x) = z(x) - \left[\frac{b}{a+b} z(x-a) + \frac{a}{a+b} z(x+b) \right] \quad (1)$$

gdzie:

$f(x)$ – wartość strzałki [mm],

$z()$ – wartość rzędnej w płaszczyźnie pionowej [mm];

a, b – podział cięciwy (dla cięciwy symetrycznej $a = b$) [m].

4. Analiza nierówności pionowych

W analizie nierówności pionowych uwzględnia się trzy zakresy długości fal (tab. 1). Podstawowym i wymaganym jest zakres D1, który związany jest z bezpieczeństwem jazdy. Natomiast pozostałe zakresy fal (D2 i D3) stosowane są przy większych prędkościach i uwzględniają spokojność jazdy oraz umożliwiają ocenę kształtu łuków wyokrąglających załomy profilu podłużnego.

Tab. 1. Zakresy długości fal nierówności pionowych

	Zakres długości fali [m]	Zakres prędkości [km/h]
D1	$3 < \lambda \leq 25$	cały zakres
D2	$25 < \lambda \leq 70$	$V > 160$
D3	$70 < \lambda \leq 150$	$V > 250$

Źródło: [6,10]

W celu obliczenia nierówności pionowych dla określonego zakresu długości fal (D1, D2 lub D3) należy przefiltrować pomierzone wartości sygnału. Zaleca się stosowanie filtra Butterwortha czwartego rzędu z określoną długością fali odcięcia, np. dolnego 3 m i górnego 25 m, tj. w pełnym zakresie pomiaru nierówności D1. W celu wykrywania krótkich fal dolna granica zakresu D1 powinna być zmniejszona do 1 m [7].

Przyjmując sinusoidalny kształt nierówności toru, pojedynczą falę o długości λ , amplitudzie A i przesunięciu fazowym φ można opisać wyrażeniem:

$$(x) = A \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} + \varphi\right) \quad (2)$$

gdzie:

A – amplituda fali [mm],

λ – długość fali [m],

φ – przesunięcie fazowe [rad].

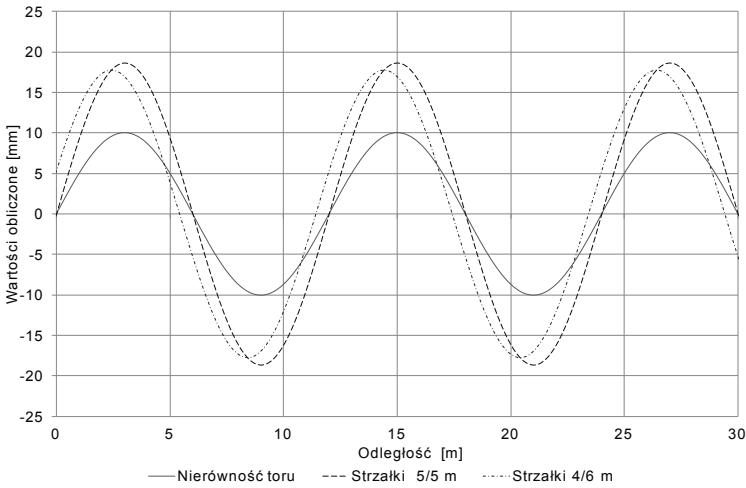
Wówczas zależność między nierównością pionową i strzałką pionową można zapisać w postaci:

$$f(x) = A|H(\lambda)| \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} + \varphi\right) \quad (3)$$

gdzie:

$|H(\lambda)|$ – moduł funkcji przejścia układu cięciwowego [4].

Na rys. 8 przedstawiono zależność między nierównością pionową toru o kształcie sinusoidalnym (długości fali $\lambda = 12$ m i amplitudzie $A = 10$ mm), a obliczonymi strzałkami na cięciwie symetrycznej i asymetrycznej. W tym przypadku wartości strzałek pionowych są większe o ponad 70% od rzeczywistych nierówności toru.

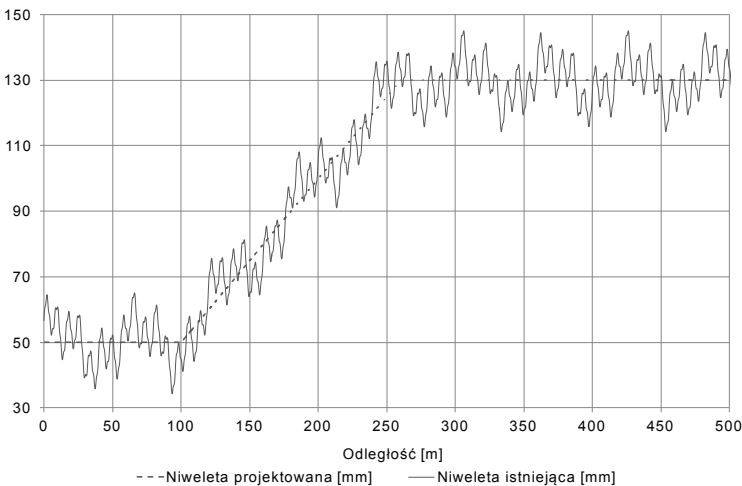


Rys. 8. Wykres pojedynczej nierówności toru i pomierzonych strzałek pionowych
 Źródło: opracowanie własne

5. Przykład obliczeń

W celu wyjaśnienia różnic między pomierzonymi strzałkami i nierównościami pionowymi przedstawiono przykład, który opisuje niweletę toku zewnętrznego w łuku kołowym z prostoliniową rampą przechyłkową. Wysokości teoretyczne niwelety $H(x)$ opisane zostały zależnością (rys. 9):

$$H(x) = \begin{cases} 50 & \text{jeżeli } 0 \leq x < 100 \\ 50 + 0,5(x - 100) & \text{jeżeli } 100 \leq x \leq 260 \\ 130 & \text{jeżeli } x > 260 \end{cases} \quad (4)$$



Rys. 9. Wykres niwelety istniejącej i projektowanej
 Źródło: opracowanie własne

Tab. 2. Cbarakterystyka fal nierówności toru

Numer fali i	1	2	3	4
Amplituda fali A_i [mm]	1	6	4	6
Długość fali λ_i [m]	2	8	20	60
Przesunięcie fazowe ϕ_i [rad]	0,5	0,2	0,4	0,6

Źródło: opracowanie własne

Nierówności pionowe toru opisane zostały sumą czterech fal o różnej charakterystyce (tab. 2) względem teoretycznej niwelety. Wartości rzędnych istniejącej niwelety wyznaczone zostały z wyrażenia (rys. 9):

$$z(x) = H(x) + \sum_{i=1}^4 A_i \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_i} x + \varphi_i\right) \quad (5)$$

gdzie:

 x – odległość [m], i – numer fali, A_i – amplituda i -tej fali [mm], λ_i – długość i -tej fali [m], φ_i – przesunięcie fazowe i -tej fali.

Znając rzędne $z(x)$ wartości strzałek pionowych $f(x)$ na cięciwie symetrycznej o długości 10 m można obliczyć z wyrażenia:

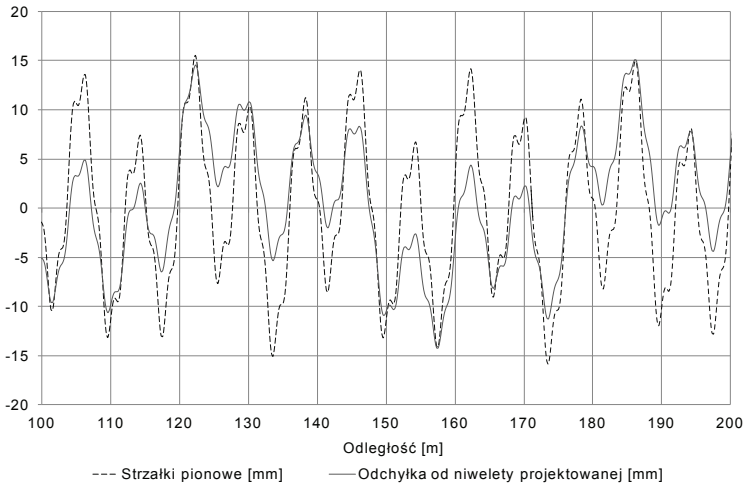
$$f(x) = z(x) - \frac{Z(x-5) + z(x+5)}{2} \quad (6)$$

a różnicę $\Delta z(x)$ między rzędną niwelety istniejącej $z(x)$ i projektowanej $H(x)$ z wzoru:

$$\Delta z(x) = z(x) - H(x) = \sum_{i=1}^4 A_i \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_i} x + \varphi_i\right) \quad (7)$$

Analizując obliczone strzałki pionowe $f(x)$ i różnice $\Delta z(x)$ można stwierdzić, że w opisanym przykładzie wartości strzałek są większe w porównaniu z rzeczywistymi odchyłkami nierówności toru od projektowanej niwelety (rys. 10).

Zastosowanie metody cięciwowej wymaga przefiltrowania pomierzonych strzałek w celu wyeliminowania wpływu funkcji przejścia, tzn. przekształcenie pomierzonych strzałek pionowych na nierówności pionowe. W tym celu należy obliczyć transformatę Fouriera w przyjętym oknie pomiarowym i aproksymować pomierzone strzałki skończonym szeregiem Fouriera. Otrzymane sygnały należy przefiltrować filtrem Butterwortha czwartego rzędu z określoną długością fali odcięcia, odpowiednio w zakresie D1 i D2.

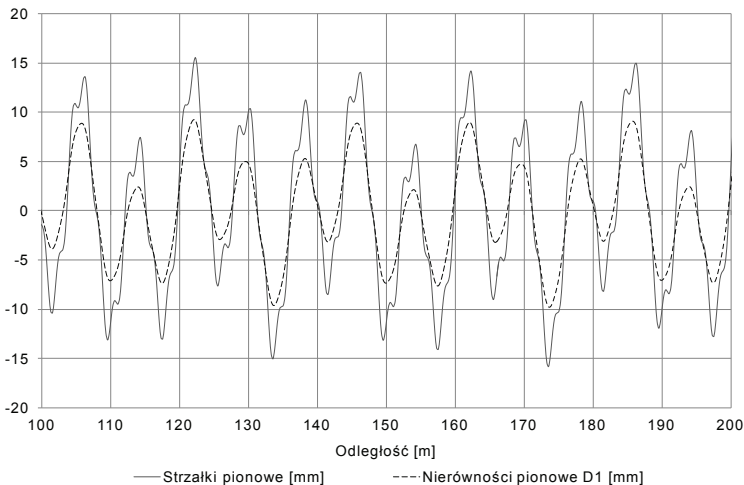


Rys. 10. Wykres strzałek pionowych i odchyłek od niwelety projektowanej

Źródło: opracowanie własne

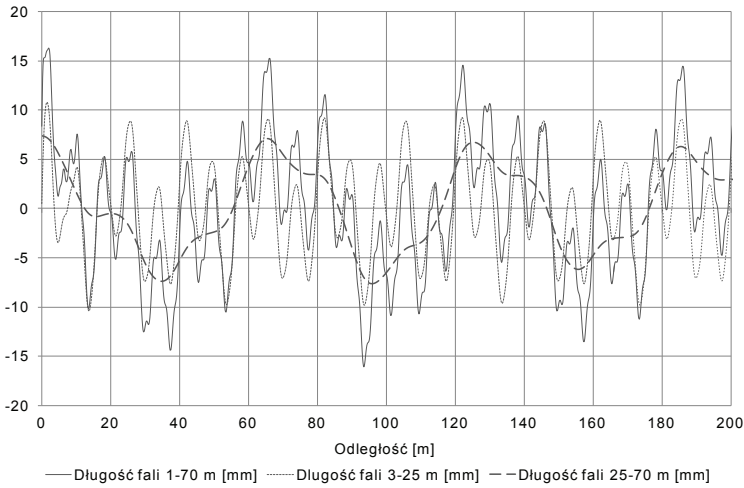
Na rys. 11 przedstawiono wykresy obliczonych strzałek $f(x)$ i nierówności pionowych w zakresie długości fal D1. Należy zauważyć, że w opisywanym przykładzie wartości strzałek są większe od nierówności pionowych D1. Wynika to z faktu, że w większości analizowanych przypadków dominującymi długościami nierówności toru są fale o długości w zakresie $8 \div 12$ m, gdzie moduł funkcji przejścia jest większy od jedności.

W celu porównania nierówności pionowych w różnych zakresach długości fal, obliczone zostały również nierówności D2 ($25 \div 70$ m) i nierówności w zakresie długości fal $1 \div 70$ m (rys. 12).



Rys. 11. Wykres strzałek pionowych i nierówności pionowych D1

Źródło: opracowanie własne



Rys. 12. Wykresy nierówności pionowych przy różnych długościach fal odcięcia
Źródło: opracowanie własne

6. Wnioski

W celu ujednoczenia zasad oceny stanu geometrii toru na europejskiej sieci kolejowej wprowadzono minimalne wymagania w zakresie charakterystyki podstawowych parametrów, metody ich pomiaru i analizy. Wymagania te zapisane zostały w Technicznej Specyfikacji Interoperacyjności dla podsystemu Infrastruktura oraz normach powiązanych PN-EN 13848 i PN-EN 14363.

Stosowany przez wielu zarządców cięciwowy system pomiaru nierówności pionowych charakteryzuje się niezmiennością lokalizacji wady, a specyficzną właściwością jest to, że nierówności toru generują okresowy sygnał o tej samej długości fali, ale o różnej amplitudzie i fazie. W celu wyeliminowania wpływu funkcji przejścia cięciwowego systemu pomiarowego i uzyskania względnego kształtu niezbędne jest przefiltrowanie pomierzonych strzałek.

Nierówności pionowe D1 w zakresie długości fal 3 ÷ 25 m odzwierciedlają nierównomierne odkształcenie podsypki i podtorza i są wynikiem zróżnicowanych cech dynamicznych nawierzchni kolejowej. Natomiast odkształcenia toru o długości fal 25 ÷ 70 m (nierówności pionowe D2) analizuje się z uwagi na spokojność jazdy i są one wynikiem błędów popełnianych przy tyczeniu niwelety toru i łuków zaokrąglających załomy oraz budowie i naprawach nawierzchni kolejowej.

Porównując otrzymane wartości nierówności pionowych w zakresie długości fal D1 i strzałek pionowych na symetrycznej cięciwie o długości 10 m można stwierdzić, że dominującymi długościami pojedynczych nierówności są fale w zakresie 8 ÷ 12 m. W takim przypadku moduł funkcji przejścia jest dużo większy od jedności, a zatem maksymalne amplitudy pojedynczych nierówności pionowych D1 stanowią około 70% wartości amplitud pomierzonych w tych miejscach strzałek pionowych.

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] Kędra Z., Ekonomiczne aspekty strategii utrzymania torów kolejowych. Logistyka 3/2014, s.2862-2869.
- [4] Kędra Z., Nierówności pionowe toru kolejowego. Logistyka 6/2014, s.5341-5350.
- [5] PN-EN 14363: Kolejnictwo. Badania właściwości dynamicznych pojazdów szynowych przed dopuszczeniem do ruchu. Badanie właściwości biegowych i próby stacjonarne.
- [6] PN-EN 13848-1: Kolejnictwo. Tor. Jakość geometryczna toru. Część 1: Charakterystyka geometrii toru.
- [7] PN-EN 13848-2: Kolejnictwo. Tor. Jakość geometryczna toru. Część 2: Systemy pomiarowe. Pojazdy do pomiaru toru.
- [8] PN-EN 13848-3: Kolejnictwo. Tor. Jakość geometryczna toru. Część 3: Systemy pomiarowe. Maszyny do budowy i utrzymania toru.
- [9] PN-EN 13848-4: Kolejnictwo. Tor. Jakość geometryczna toru. Część 4: Systemy pomiarowe. Urządzenia lekkie i ręczne.
- [10] PN-EN 13848-5: Kolejnictwo. Tor. Jakość geometryczna toru. Część 5: Poziom jakości geometrycznej. Szlak.
- [11] PN-EN 13848-6: Kolejnictwo. Tor. Jakość geometryczna toru. Część 6: Charakterystyka jakości geometrycznej toru.
- [12] Rozporządzenie Komisji (UE) Nr 1299/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. dotyczące technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Infrastruktura” systemu kolei w Unii Europejskiej.
- [13] Towpik K., Utrzymanie nawierzchni kolejowej. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1990.
- [14] 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.
- [15] Lewis R., Track geometry recording and usage [online]. Notes for a lecture to Network Rail – Infrastructure Monitoring, April 2011 [dostęp 08 marca 2014]. Dostępny w Internecie: www.infrastructuremonitoring.co.uk/~T/Track-Recording-And-Usage.pdf.
- [16] Materiały informacyjne firmy MER MEC S.p.A. (<http://www.mermecgroup.com>).

