

KĘDRA Zbigniew¹

Nierówności pionowe toru kolejowego

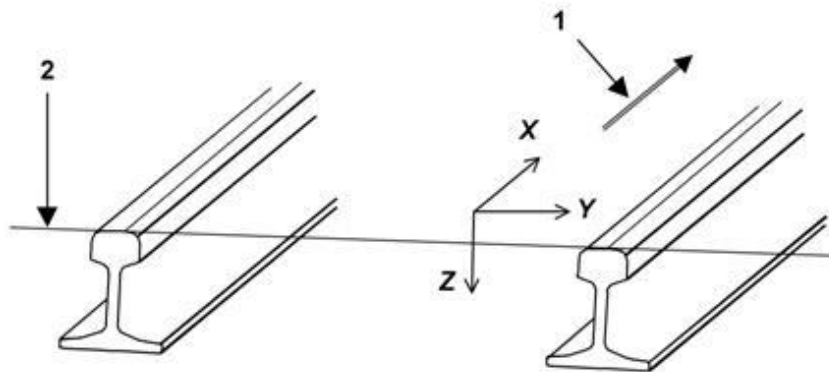
WSTĘP

Na jednolitym rynku kolejowych usług transportowych w Unii Europejskiej każdy zarządca infrastruktury musi uzyskać autoryzację bezpieczeństwa. Jest to dokument potwierdzający posiadanie przez zarządcę infrastruktury systemu zarządzania bezpieczeństwem oraz zdolność spełniania przez niego wymagań niezbędnych do bezpiecznego projektowania, eksploatacji i utrzymania infrastruktury kolejowej. Minimalne wymagania dotyczące torów i rozjazdów zapisane zostały w Technicznej Specyfikacji Interoperacyjności dla podsystemu Infrastruktura [2].

Jednym z istotnych problemów po wprowadzeniu TSI Infrastruktura jest dostosowanie przepisów krajowych dotyczących utrzymania infrastruktury kolejowej, a w szczególności oceny jakości geometrycznej toru. W tym zakresie zarządca infrastruktury kolejowej jest zobowiązany do zapisania w planie utrzymania wartości progów natychmiastowego działania IAL, interwencyjnego IL i ostrzegawczego AL dla następujących parametrów [2]:

- nierówności pionowych i poziomych – maksymalną wartość pojedynczej wady (nierówność izolowana) oraz odchylenie standardowe (tylko próg ostrzegawczy),
- wichrowatości – wady pojedyncze – maksymalna odchyłka od zera, zależna od progów natychmiastowego działania,
- szerokości toru – maksymalne odchylenie od wartości nominalnej i wartość średnia na odcinku 100 m, zależne od progów natychmiastowego działania,
- przechyłki – maksymalna odchyłka od wartości projektowanej, zależna od progów natychmiastowego działania.

Jakość geometryczna toru opisana jest za pomocą względnego układu współrzędnych (Rys. 1), który dowiązany jest do osi toru. Oś X jest zgodna z kierunkiem ruchu, oś Y jest równoległa do powierzchni toczonej, a oś Z prostopadła do powierzchni toczonej i skierowana w dół.



Rys. 1. Względny układ współrzędnych [6]: 1 – kierunek ruchu, 2 – powierzchnia toczonej, 3 – układ współrzędnych toru

W procesie utrzymania nawierzchni kolejowej szczególnie znaczenie mają nierówności pionowe i ich odchylenie standardowe, które wykorzystywane jest w planowaniu napraw (podbijania toru). Nierówności w płaszczyźnie pionowej najczęściej klasyfikuje się z uwagi na długość fali odkształcenia, którą można łączyć z przyczyną deformacji toru.

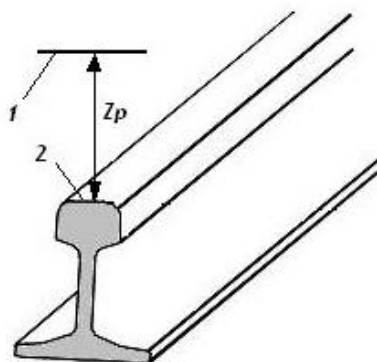
¹ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Transportu Szynowego i Mostów, kedra@pg.gda.pl

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÷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÷25 m. Natomiast odkształcenia toru o długości fal 25÷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÷150 m wykorzystywany jest wyłącznie na liniach o prędkości większej od 250 km/h [1,2,12].

W celu ujednoczenia zasad pomiarów i oceny stanu geometrii toru kolejowego Europejski Komitet Normalizacyjny CEN opracował sześć norm serii EN 13848, które zostały w takiej samej formie przyjęte w Polsce.

1 DEFINICJA, METODA POMIARU I ODCHYLENIA DOPUSZCZALNE

Norma PN-EN 13848-1 [6] definiuje nierówności pionowej (*longitudinal level*) jako odchylenie z_p 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). Nierówności pionowe są mierzone i obliczane oddzielnie dla toku lewego i prawego.



Rys. 2. Nierówności pionowe [6]: 1 – linia odniesienia; 2 – powierzchnia toczna główki szyny

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. Otrzymujemy wówczas względne odkształcenie toków szynowych, które nie może być utożsamiane z rzeczywistym kształtem toru w płaszczyźnie pionowej. Przyczyną tego są stosowane obecnie systemy pomiarowe, który pozwalają na odwzorowanie kształtu toru tylko do określonej długości fal.

Zgodnie z normą PN-EN 13848-1 [6] nierówności pionowe powinny być mierzone metodą inercyjną lub cięciwową (zaleca się by 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 wózków pomiarowych muszą spełniać wymagania opisane w normach [7,8,9].

Przy pomiarach nierówności pionowych toru kolejowego uwzględnia się trzy zakresy długości fal (Tab. 1). Podstawowym i wymaganym zakresem długości fal jest D1, a zakres D2 jest stosowany dla prędkości większych od 160 km/h. W celu wykrywania krótkich fal dolna granica zakresu D1 powinna być zmniejszona do 1m.



Tab. 1. Zakresy długości fal nierówności pionowych [6,10]

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

W celu obliczenia nierówności pionowych dla określonego zakresu długości fal (D1, D2 lub D3) należy przefiltrować wartości pomierzone sygnału. Zaleca się stosowanie filtra Butterworth'a czwartego rzędu z określoną długością fali odcięcia, np. dolnego 3 m i górnego 25 m, tj. w pełnym zakresie pomiaru nierówności D1 [7].

Wartości dopuszczalne pojedynczych odchyłek nierówności pionowych dla granicy AL, IL i IAL oraz zakresu długości fali D1 i D2 zapisane zostały w normie PN-EN 13848-5 [10], a przykładowe wartości tych odchyłek przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Nierówności pionowych – wartości graniczne pojedynczych usterek [10]

Prędkość [km/h]	AL [mm]		IL [mm]		IAL [mm]	
	D1	D2	D1	D2	D1	D2
$V \leq 80$	12÷18	-	17÷21	-	28	-
$80 < V \leq 120$	10÷16	-	13÷19	-	26	-
$120 < V \leq 160$	8÷15	-	10÷17	-	23	-
$160 < V \leq 230$	7÷12	14÷20	9÷14	18÷23	20	33
$230 < V \leq 300$	6÷10	12÷18	8÷12	16÷20	16	28

Odchylenie standardowe nierówności pionowych obliczane jest zwykle na odcinku długości 200 m tylko w zakresie długości fal D1 (Tab. 3).

Tab. 3. Nierówności pionowych – odchylenie standardowe dla poziomu ostrzegawczego AL [10]

Prędkość [km/h]	Odchylenie standardowe 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

Analizując odchyłki nierówności pionowych dla poziomu jakości AL i IL (Tab. 2) oraz ich odchylenia standardowe (Tab. 3) należy zauważyć, że wartości dopuszczalne zostały podane w pewnych zakresach. Zarządca infrastruktury kolejowej określa wartości odchyłek dopuszczalnych na podstawie przyjętej strategii utrzymania torów kolejowych, która 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 [5] dotyczącej badania właściwości dynamicznych pojazdów szynowych przed dopuszczeniem do ruchu, poziom jakości geometrii toru oparty jest na trzech kryteriach utrzymania QN1, QN2 i QN3. 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.

Poziom QN1 odnosi się do torów wymagających nadzoru lub prowadzenia napraw w ramach normalnego planu utrzymania, a QN2 wymaga prowadzenia krótkotrwałych robót konserwacyjnych. Poziom QN3 charakteryzuje natomiast odcinki toru, które nie odzwierciedlają zwykłego poziomu jakości toru lecz nie odpowiada jeszcze najbardziej niekorzystnemu stanowi utrzymania (reprezentuje stan dopuszczalny) [5].



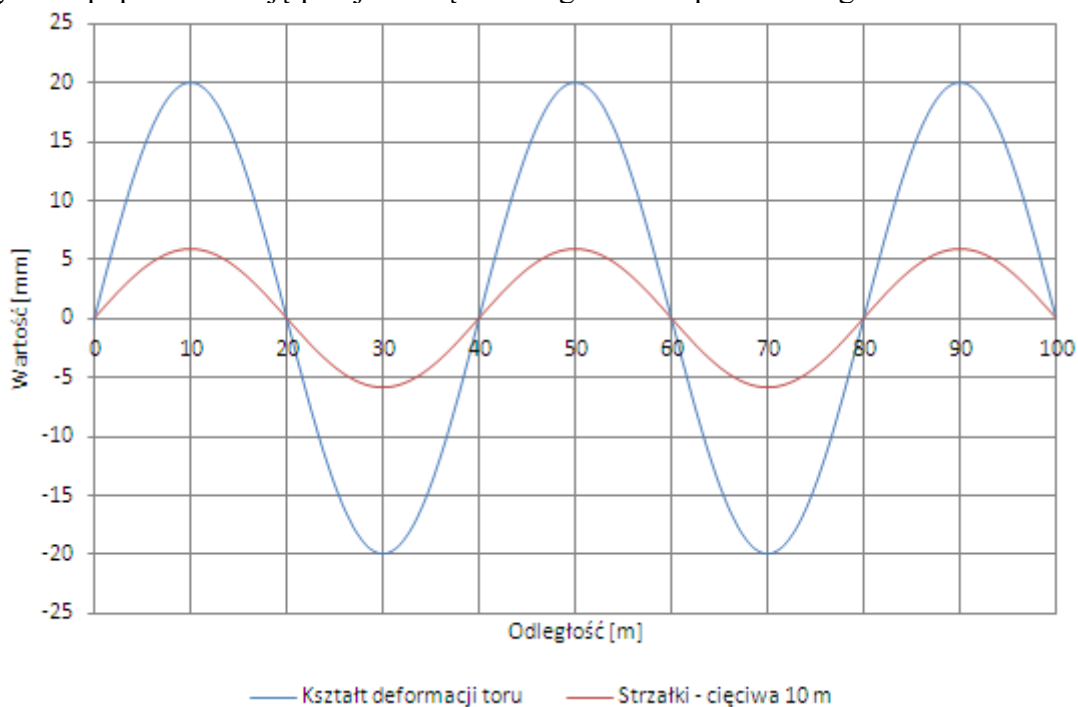
W tabeli 4 przedstawiono odchyłki dopuszczalne nierówności pionowych i odchylenia standardowego dla poziomu jakości QN, przy czym wartości $QN3=1,3 \times QN2$.

Tab. 4. Wartości odchyłek nierówności pionowych i odchylenia standardowego wg normy [5]

Prędkość [km/h]	Nierówności pionowe		
	Wartości dla poziomu jakości [mm]		
	QN1	QN2	QN3
Wartość maksymalna (średnia do wartości szczytowej)			
$V \leq 80$	12	16	21
$80 < V \leq 120$	8	12	16
$120 < V \leq 160$	6	10	13
$160 < V \leq 200$	5	9	12
$200 < V \leq 300$	4	8	10
Odchylenia standardowe			
$V \leq 80$	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

2 FUNKCJA PRZEJŚCIA UKŁADU POMIAROWEGO

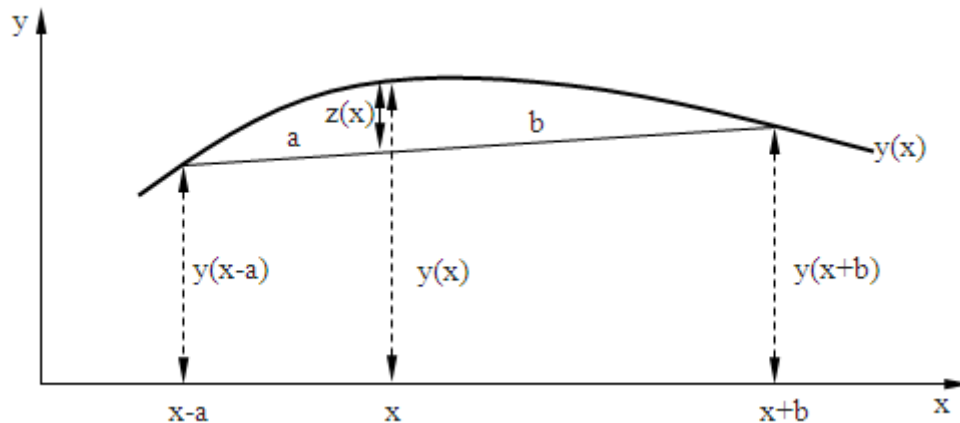
Cięciwowy system pomiarowy charakteryzuje liniowość i niezmienna lokalizacja usterki, a specyficzną właściwością jest to, że nierówności pionowe toru generują okresowy sygnał o tej samej długości fali lecz o różnej amplitudzie i fazie [4]. Oznacza to, że przy pomiarze cięciwą o długości 10 m (symetrycznym podziale cięciwy w stosunku 1:1) nierówności o długości fali 40 m i maksymalnej amplitudzie 20 mm otrzymamy sygnał o amplitudzie 5,9 mm (Rys.3). Taka zależność opisana jest matematycznie poprzez funkcję przejścia cięciwowego układu pomiarowego.



Rys. 3. Wykres nierówności toru i pomierzonych strzałek

Na rysunku 4 przedstawiono schemat wyznaczenia wartości strzałki $z(x)$ asymetryczną cięciwą o długości $l=a+b$ w układzie współrzędnych prostokątnych.





Rys. 4. Schemat wyznaczenia wartości strzałek

Wartości strzałek możemy obliczyć z wyrażenia:

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

Funkcję przejścia asymetrycznego systemu cięciwowego możemy zgodnie z pracą [4] opisać zależnością:

$$|H(\lambda)| = \sqrt{\left(1 - \frac{b}{l} \cdot \cos\left(2\pi \frac{a}{\lambda}\right) - \frac{a}{l} \cdot \cos\left(2\pi \frac{b}{\lambda}\right) \right)^2 + \left(\frac{b}{l} \cdot \sin\left(2\pi \frac{a}{\lambda}\right) - \frac{a}{l} \cdot \sin\left(2\pi \frac{b}{\lambda}\right) \right)^2} \quad (2)$$

gdzie:

l – długość cięciwy [m],

λ – długość fali nierówności [m].

Po podstawieniu do wyrażenia (1) i (2) $l/2=a=b$ otrzymamy zależności na strzałkę i funkcję przejścia symetrycznego cięciwowego systemu pomiarowego. Wartości strzałek obliczymy zatem z wzoru:

$$z(x) = y(x) - \frac{1}{2} \left[y\left(x - \frac{l}{2}\right) + y\left(x + \frac{l}{2}\right) \right] \quad (3)$$

a funkcja przejścia przyjmie postać:

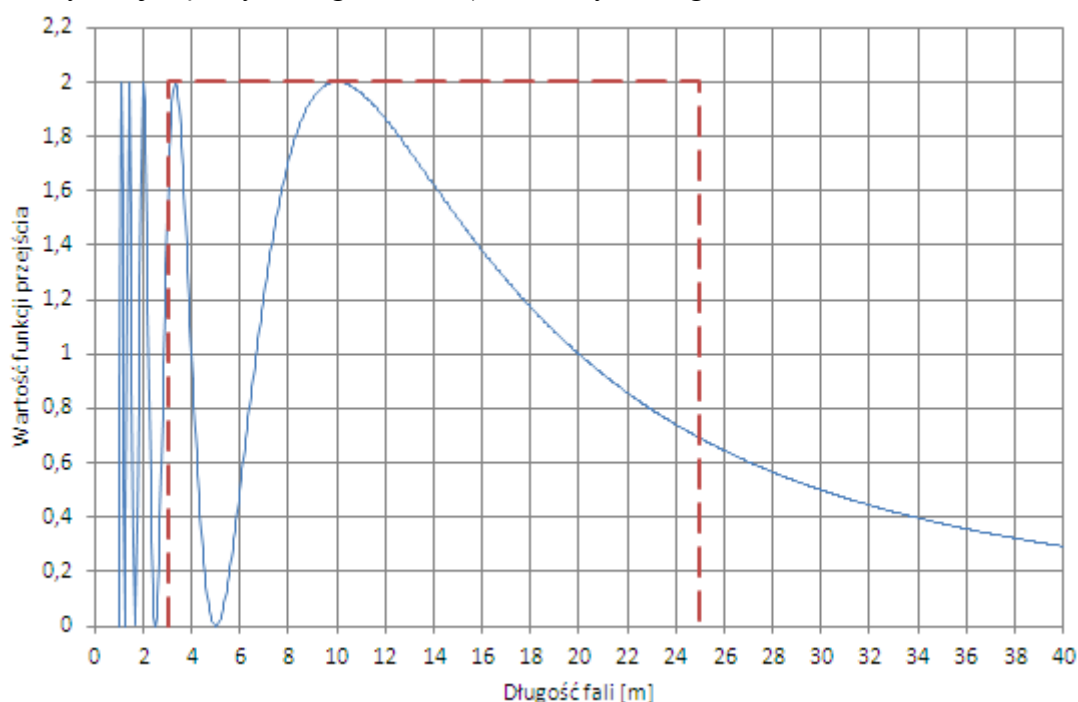
$$|H(\lambda)| = 1 - \cos\left(\pi \frac{l}{\lambda}\right) \quad (4)$$

W Polsce odkształcenia toków szynowych w płaszczyźnie pionowej mierzone są drezyną EM-120, w której zastosowano symetryczny system cięciwowy. W praktyce oznacza to, że mierzona jest strzałka odkształcenia podłużnego powierzchni toczonej główki szyny, tj. wartość rzędnej w środku cięciwy o długości 10 m.

Pomierzone wartości strzałek odchylenia pionowego stanowią podstawę do oceny stanu geometrii toru kolejowego, a zatem w Polsce obecnie nie mierzy się nierówności pionowych zgodnie z normą PN-EN 13848-1 [6]. Oznacza to, że nie są spełnione minimalne wymagania w zakresie oceny jakości geometrycznej toru zapisane w technicznej specyfikacji interoperacyjności dla podsystemu Infrastruktura [2].



W celu uzyskania względnego kształtu toru kolejowego pomierzone wartości strzałek odchylenia pionowego powinny być przefiltrowane aby wyeliminować wpływ funkcji przejścia. Na rysunku 5 przedstawiono wykres wartości funkcji przejścia dla układu pomiarowego drezyny EM-120 (tj. system symetrycznej cięciwy o długości 10 m) dla różnych długości fali odkształcenia.



Rys. 5. Wykres funkcji przejścia: czerwona linia - zakres długości fal $D1$ ($3 \div 25$ m)

Analizując wykres funkcji przejścia przedstawiony na rysunku 5 możemy zauważyć, że dla zakresu długości fal $D1$ odwzorowanie strzałek na nierówności pionowe w stosunku 1:1 ma miejsce tylko przy odkształceniu o długości fali $20/5$, $20/3$ i 20 m (wartość funkcji równa 1). Wartość strzałki będzie mniejsza dla długości fal w przedziałach $(20/5 \div 20/3)$ i $(20 \div 25)$ oraz większa $(3 \div 20/5)$ i $(20/3 \div 20)$.

Przy pomiarze względnym i sinusoidalnym kształcie nierówności strzałkę w środku cięciwy symetrycznej można opisać następującym wyrażeniem [12]:

$$z(x) = A \left[1 - \cos \left(\pi \frac{l}{\lambda} \right) \right] \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \quad (5)$$

gdzie:

- A – amplituda nierówności [mm],
- x – odległość [m].

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono przykłady porównania wartości nierówności pionowych i obliczonych strzałek. W pierwszym przypadku odkształcenie względne wyrażono sumą sinusów w postaci funkcji:

$$F(x) = 4 \sin \pi \frac{x}{8} + 8 \sin \pi \frac{x}{12} + 12 \sin \pi \frac{x}{15} \quad (6)$$

a strzałki obliczymy z wzoru:

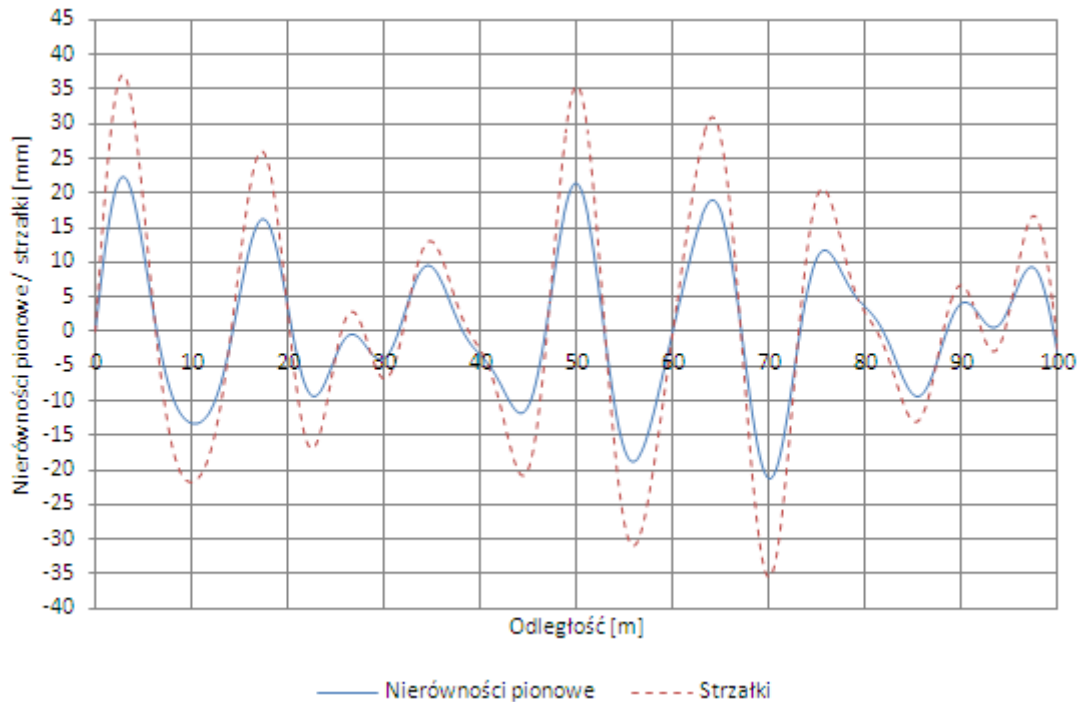
$$z(x) = 4 \left[1 - \cos \left(\pi \frac{10}{8} \right) \right] \sin \pi \frac{x}{8} + 8 \left[1 - \cos \left(\pi \frac{10}{12} \right) \right] \sin \pi \frac{x}{12} + 12 \left[1 - \cos \left(\pi \frac{10}{15} \right) \right] \sin \pi \frac{x}{15} \quad (7)$$



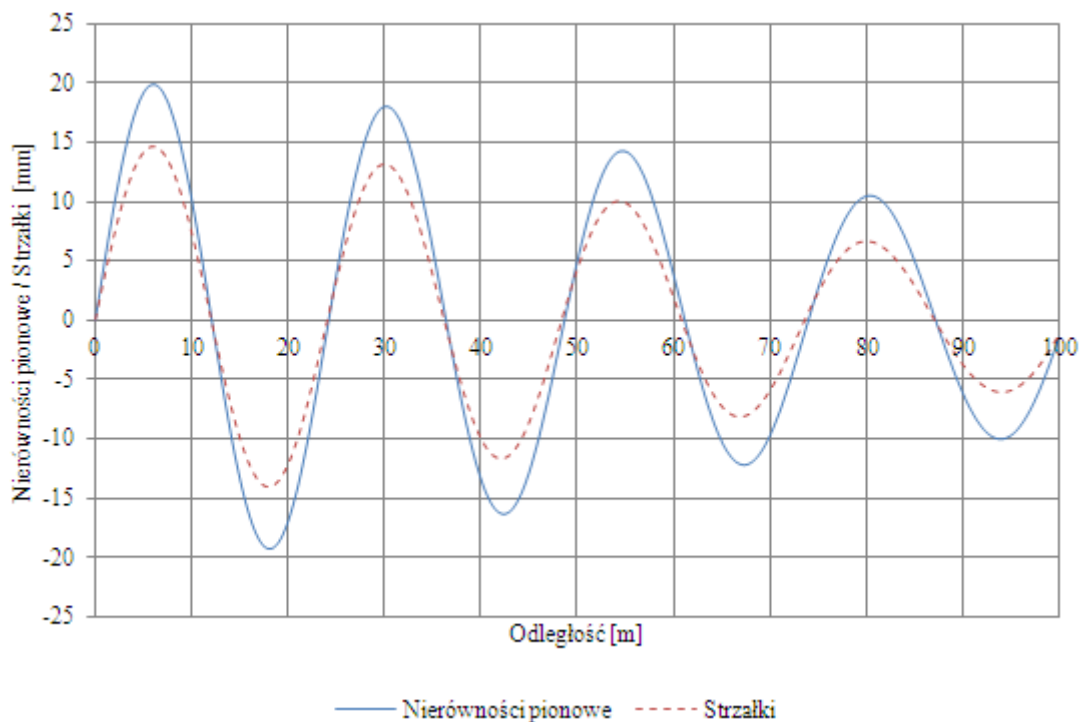
Na rysunku 7 nierówności pionowe i strzałki opisano wzorami:

$$F(x) = 5 \sin \pi \frac{x}{22} + 15 \sin \pi \frac{x}{25} \quad (8)$$

$$z(x) = 5 \left[1 - \cos \left(\pi \frac{10}{22} \right) \right] \sin \pi \frac{x}{22} + 15 \left[1 - \cos \left(\pi \frac{10}{25} \right) \right] \sin \pi \frac{x}{25} \quad (9)$$



Rys. 6. Wartości nierówności pionowych i strzałek



Rys. 7. Wartości nierówności pionowych i strzałek

3 PRZYKŁAD OBLICZEŃ

Względne odkształcenie toku szynowego w płaszczyźnie podłużnej (nierówności pionowe) opisane zostało sumą trzech fal o kształcie sinusoidalnym o różnych długościach i wyrażone funkcją:

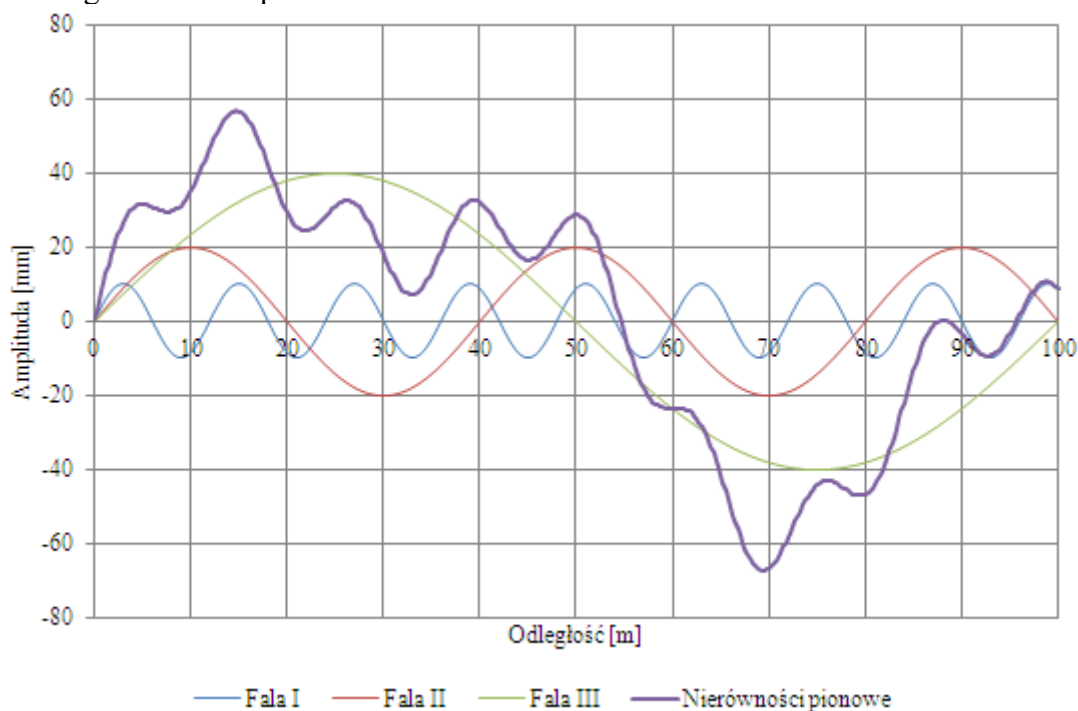
$$F(x) = A_1 \sin \pi \frac{x}{\lambda_1} + A_2 \sin \pi \frac{x}{\lambda_2} + A_3 \sin \pi \frac{x}{\lambda_3} \quad (10)$$

W obliczeniach uwzględniono nierówności w trzech zakresach długości fal D1, D2 i D3, a wartości amplitud A_i oraz długości fali λ_i przedstawia tabela 5.

Tab. 5. Dane do przykładu

Numer fali	Zakres długości fal [m]	Długość fali λ_i [m]	Amplituda A_i [mm]
I	D1: $3 < \lambda \leq 25$	12	10
II	D2: $25 < \lambda \leq 70$	40	20
III	D3: $70 < \lambda \leq 150$	100	40

Na rysunku 8 przedstawiono wykres nierówności pionowych, jako sumą trzech fal o przyjętych w przykładzie długościach i amplitudach.



Rys. 8. Wykres nierówności pionowych (suma trzech fal o różnych długościach)

Wartości strzałek obliczone w środku cięciwy o długości $l=10$ m możemy wyrazić wzorem:

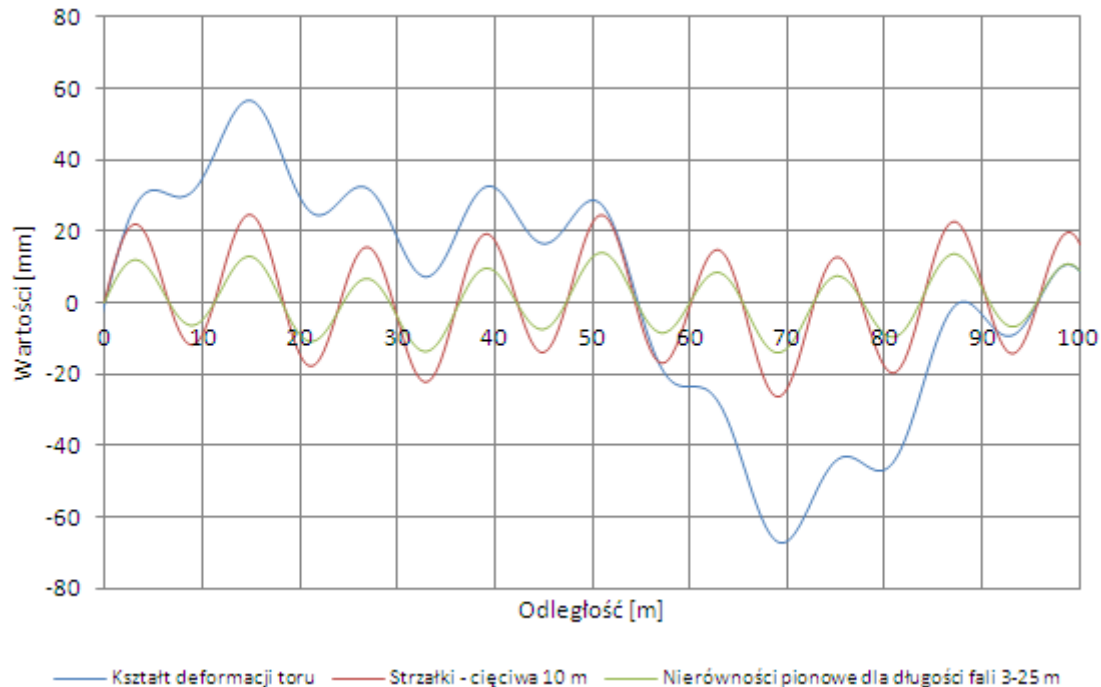
$$z(x) = A_1 \left[1 - \cos \left(\pi \frac{l}{\lambda_1} \right) \right] \sin \pi \frac{x}{\lambda_1} + A_2 \left[1 - \cos \left(\pi \frac{l}{\lambda_2} \right) \right] \sin \pi \frac{x}{\lambda_2} + \\ + A_3 \left[1 - \cos \left(\pi \frac{l}{\lambda_3} \right) \right] \sin \pi \frac{x}{\lambda_3} \quad (11)$$

Do oceny jakości geometrycznej toru wykorzystuje się nierówności pionowych w zakresie długości fal D1 ($3 \div 25$ m). W tym celu należy przefiltrować wartości pomierzone sygnału w układzie



względny filtr Butterworth'a czwartego rzędu w pełnym zakresie pomiaru nierówności D1, tj. dla fali odcięcia dolnego 3 m i górnego 25 m oraz nachylenia zbocza filtru 24db/oktawę [7].

Na rysunku 9 przedstawiono porównanie wartości obliczonych strzałek i nierówności pionowych w zakresie długości fal D1. Dla przyjętych danych strzałki są prawie dwa razy większe od nierówności pionowych w zakresie D1 oraz widać wyraźny wpływ nierówności o długich falach na ich wartości.



Rys. 9. Porównanie obliczonych wartości strzałek i nierówności pionowych

WNIOSKI

Wprowadzenie w UE jednolitego rynku usług transportu kolejowego wiąże się z koniecznością stosowania przez państwa członkowskie systemu zarządzania bezpieczeństwem oraz spełnieniem minimalnych wymagań w zakresie projektowania, eksploatacji i utrzymania infrastruktury transportowej.

Ocena stanu geometrii toru kolejowego wymaga stosowania jednolitych metod oceny wartości progowych odchyłek dopuszczalnych. Oznacza to, że zarządca infrastruktury musi spełniać minimalne wymagania, które może zastrzyć (np. zmniejszyć wartości graniczne).

Do pomiaru nierówności pionowych zaleca się stosowanie systemów pomiarowych inercyjnych, których funkcja przejścia przyjmuje wartości zbliżone do jedności w jak najdłuższym zakresie długości fal.

Pomiary wykonane systemem cięciwowym należy przefiltrować z wykorzystaniem funkcji przejścia w celu uzyskania nierówności pionowych w układzie względnym.

Streszczenie

Ocena jakości geometrycznej toru kolejowego wymaga od zarządców infrastruktury stosowania jednolitych metod pomiarów, obliczania i interpretacji wyników. W tym zakresie należy stosować się do norm europejskich i technicznych specyfikacje interoperacyjności.

W artykule przedstawiono podstawowe zagadnienia związane z pomiarem i oceną nierówności pionowych toru kolejowego. Zapisano odchyłki dopuszczalne nierówności pionowych według różnych norm i sposób ich interpretacji.

Przedstawiono przykłady obliczania i interpretacji strzałek i nierówności pionowych oraz filtrację sygnału pomiarowego w celu uzyskania nierówności w przyjętym zakresie długości fal.



Longitudinal level of railway track

Abstract

Quality rating geometric rail track infrastructure managers require the use of uniform methods of measurement, calculation and interpretation of results. In this respect, it should adhere to European standards and technical specifications for interoperability.

This article presents basic issues related to the measurement and evaluation of longitudinal level rail track. Filed permissible deviation of longitudinal level according to different standards and the way they are interpreted.

The examples of calculation and interpretation of the versine value and longitudinal level and filtering of the measurement signal in order to obtain irregularities in the accepted range of wavelengths.

BIBLIOGRAFIA

1. Bałuch H., Bałuch M.: Determinanty prędkości pociągów – układ geometryczny i wady toru. Instytut Kolejnictwa, Warszawa 2010.
2. Decyzja komisji z dnia 26 kwietnia 2011 r. dotycząca technicznej specyfikacji interoperacyjności podsystemu „infrastruktura” transeuropejskiego systemu kolei konwencjonalnych. 2011/275/UE.
3. 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.
4. Lichtberger B.: Track Compendium. Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics. Eurail press, 2005.
5. PN-EN 14363:2007: 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. Towpik K.: Utrzymanie nawierzchni kolejowej. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1990.

