

METODY OKREŚLANIA NIEJEDNORODNOŚCI NAWIERZCHNI KOLEJOWEJ I ICH ZASTOSOWANIE¹

Henryk Bałuch

Prof. dr hab. inż., Instytut Kolejnictwa

Maria Bałuch

Dr hab. inż. prof., Instytut Kolejnictwa

Streszczenie. *Niejednorodność nawierzchni kolejowej oznacza różnice jej stanu na sąsiednich odcinkach. Niejednorodność jest zjawiskiem niekorzystnym, ponieważ wymaga napraw toru dostosowanych do najgorszych odcinków. Rozróżnia się niejednorodność geometryczną i konstrukcyjną. Określanie niejednorodności geometrycznej jest możliwe za pomocą dwóch metod – parametrycznej i syntetycznej. Artykuł przedstawia opis tych metod i ich przykłady. We wnioskach podkreślono znaczenie oceniania niejednorodności dla doskonalenia działalności modernizacyjnej.*

Słowa kluczowe: tor kolejowy, niejednorodność

1. Wprowadzenie

Niejednorodność nawierzchni kolejowej jest zjawiskiem szkodliwym, wymagającym dostosowania cykli napraw o charakterze ciągłym, głównie zaś podbijania torów, do krótkiego odcinka o największych nierównościach. Niejednorodność nawierzchni dotyczy jej cech geometrycznych i konstrukcyjnych. W pierwszym przypadku odnosi się do zróżnicowania nierówności toru. Zmiany układu geometrycznego nie są natomiast traktowane jako niejednorodność. Zróżnicowany stopień degradacji nawierzchni oznacza niejednorodność konstrukcyjną. Pojęcie to nie obejmuje jednak poprawnie wykonanych przejść od jednego typu szyn do drugiego, przejść z podkładów drewnianych na betonowe lub z konstrukcji podsypkowej na bezpodsypkową. Pojęcia niejednorodności można używać również do pewnych elementów nawierzchni, np. do zróżnicowania struktury stali w strefie spawania szyn.

Według słownika [7] wyraz *niejednorodny* oznacza *składający się z elementów o różnych cechach lub pochodzeniu*. Definicja ta odpowiada ściśle niejednorodności konstrukcyjnej, natomiast w przypadku niejednorodności geometrycznej, gdzie trudno byłoby wskazać oddzielne elementy lub pochodzenie, wymaga pewnego uzasadnienia. Uzasadnieniem tym może być synonim wyrazu *zróżnicowanie*, którym jest *różnorodność*. Nie chcąc więc tworzyć dwóch pojęć *niejednorodność konstrukcyjna* oraz *zróżnicowanie geometryczne* można – nie naruszając poprawności języka polskie-

¹ Wkład procentowy poszczególnych autorów: Bałuch H. 50%, Bałuch M. 50%

go – używać wyrazu *niejednorodność* również w odniesieniu do stanu geometrycznego, ściślej zaś do nierówności toru. Niejednorodnością geometryczną nawierzchni kolejowej jest więc zróżnicowanie jej nierówności na określonym odcinku toru.

W zdecydowanej większości prac poświęconych dynamice nawierzchni konstrukcja ta jest rozpatrywana jako jednorodna, np. [2] lub wspomina się o niejednorodności, nie podając jej bliższych charakterystyk [9]. Niejednorodność odnosi się natomiast częściej do podłoża [10]. Na niejednorodność nawierzchni, jako na zjawisko szkodliwe, zwrócono uwagę w pracy [1].

Pierwsze prace nad niejednorodnością nawierzchni kolejowej podjęto w latach siedemdziesiątych ubiegłego stulecia [3,4,5]. Założono przy tym, że niejednorodność powinna być wyrażana kryteriami liczbowymi, opartymi na znanych i sprawdzonych metodach statystycznych. Do wyznaczania niejednorodności geometrycznej przyjęto wówczas szerokość toru i różnice wysokości toków szynowych (przechyłkę). Ich różnice określano przy zastosowaniu rozkładów χ^2 . Niejednorodność konstrukcyjną oparto na podstawie ugięć szyn. Metoda ta wymagała więc badań dynamicznych.

Możliwymi zakresami zastosowań badań niejednorodności nawierzchni według ówczesnych poglądów mogły być:

- 1) porównywanie jakości robót wykonywanych w tych samych warunkach przez różne zespoły,
- 2) wyznaczanie określonych odcinków torów do badań pojazdów szynowych,
- 3) przypadki szczególne, np. badanie przyczyn wykołajeń.

Podkreślano przy tym, że analiza niejednorodności nawierzchni nie powinna zastępować oceny jej wadliwości, powinna natomiast stanowić uzupełnienie tej oceny.

2. Określanie niejednorodności przy zastosowaniu współczesnych technik

2.1. Założenia ogólne

Przy określaniu stanu nawierzchni używa się często skalowania psychologicznego nazywając ten stan dobrym, przeciętnym, złym, itp. Tęgo rodzaju ocena jest oceną rozmytą, w dodatku bez określenia funkcji przynależności, która może się wahać w przedziale [0,1]. Stosowanie oceny opisowej jest właściwe w odniesieniu do niejednorodności konstrukcyjnej, chociaż i tym przypadku można rozróżniać klasy uszkodzeń [6], natomiast ocena niejednorodności geometrycznej, stanowiącej przedmiot artykułu, powinna być oceną liczbową.

Powszechne stosowanie toromierzy elektronicznych i obrazowanie wyników pomiarów tymi toromierzami w systemie SOHRON uzasadnia odejście od poprzedniej metody określania niejednorodności, wymagającej więcej czasu i trudniejszej w interpretacji.

Geometryczna niejednorodność nawierzchni może być określana w postaci:

- parametrycznej, obliczanej na podstawie wybranych oddzielnych wielkości,
- syntetycznej, tj. opartej na wielkości charakteryzującej łącznie najważniejsze nierówności toru.

W obu przypadkach przyjęto następujące założenia:

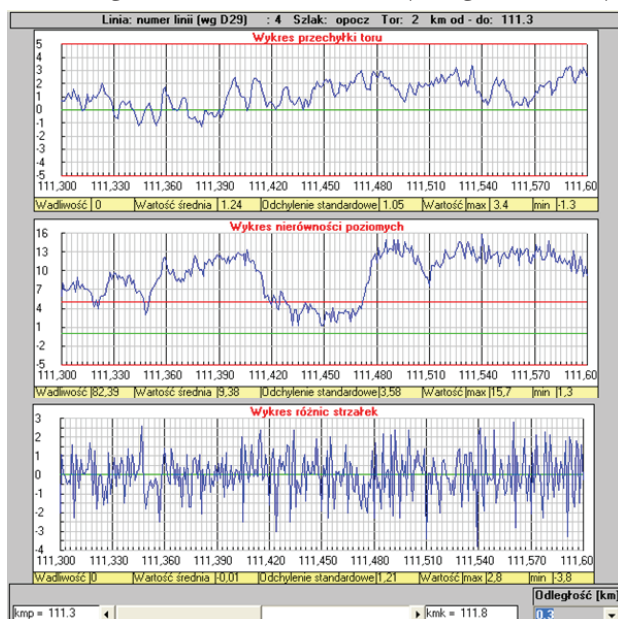
- niezależność od maksymalnej prędkości pociągów,
- wykonywanie obliczeń na odcinkach toru o długości $100 \div 300$ m.

Uniezależnienie od prędkości maksymalnej, a zatem od odchyłek dopuszczalnych, tzn. zaliczenie tej metody do metod bezwzględnych, oznacza jednakową miarę dla torów znajdujących się w różnym stanie.

Postać parametryczna opiera się na nierównościach pionowych oraz różnicy strzałek sąsiednich. Nierówności pionowe są najlepszym odzwierciedleniem zróżnicowania stanu podłoża kolejowego, przyjęcie zaś różnic strzałek sąsiednich zamiast nierówności poziomych, wynika z częstych błędów popełnianych w pomiarach tych nierówności. Błędy w odwzorowaniu nierówności poziomych, mierzonych toromierzami elektronicznymi są powodowane następującymi przyczynami:

- nieodpowiednim skalibrowaniem toromierza na prostym odcinku toru i niedostrzeżeniem przez operatora, że na takim torze wartość strzałek waha się w granicach kilkunastu mm,
- odbiciem rolki pomiarowej na zanieczyszczeniu przylegającym do bocznej powierzchni główki szyny,
- pominięciem wprowadzenia do charakterystyki mierzonego odcinka nominalnego układu geometrycznego.

Przykładem błędu pomiaru nierówności poziomych jest rysunek 1 przedstawiający odcinek toru o długości 300 m na Centralnej Magistrali Kolejowej.



Rys. 1. Wykresy nierówności toru na CMK

Różnice wysokości toków szynowych (przechyłka) na tym odcinku wahają się w granicach 5 mm (3,4 do -1,3), co oznacza, że jest to odcinek prosty. Na długości ok. 30 m na wykresie nierówności poziomych różnica strzałek wyniosła 12 mm, co oznaczałoby istnienie krótkiej krzywej przejściowej do łuku o promieniu 1040 m. Takich układów geometrycznych na CMK nie ma. Odchylenie standardowe nierówności poziomych równe 3,58 mm nie odzwierciedla w tym przypadku stanu rzeczywistego. Błąd ten przenosi się również na wykres strzałek sąsiednich, lecz w stopniu znacznie mniejszym (odchylenie standardowe 1,21 mm).

Miarą nierówności w metodzie parametrycznej są odchylenia standardowe. Ich przyjmowanie jako miar poszczególnych parametrów toru jest praktykowane na wielu kolejach. W przypadku, gdy rozkład pomiarów jest zbliżony do rozkładu normalnego (co nie zawsze się zdarza), zastosowanie znanej metody *trzech sigma* daje wyobrażenie o granicznych wartościach rozpatrywanego parametru. W przypadku trzech parametrów widocznych na rysunku 1 zastosowanie metody *trzech sigma* daje następujące wartości maksymalne: 3,15, 10,74 i 3,63 mm. W pierwszym i trzecim przypadku są one zbliżone do wartości obliczonych w systemie SOHRON, w drugim zaś znacząco się różnią.

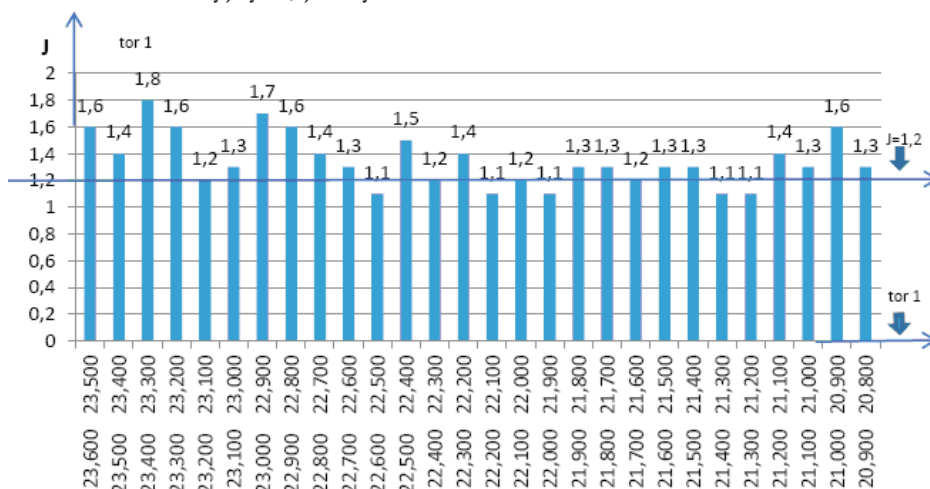
Miarą niejednorodności określanej w postaci syntetycznej jest syntetyczny wskaźnik stanu toru J , określany wzorem:

$$J = \frac{\sigma_z + \sigma_y + \sigma_w + 0,5\sigma_e}{3,5} \quad (1)$$

gdzie:

$\sigma_z, \sigma_y, \sigma_w, \sigma_e$ - odchylenia standardowe odpowiednio: nierówności pionowych, nierówności poziomych, wichrowatości toru i szerokości toru.

Przykładem przedstawiającym niejednorodność syntetyczną, po zakończeniu robót modernizacyjnych, jest rysunek 2.



Rys. 2. Niejednorodność nawierzchni kolejowej wyrażona syntetycznym wskaźnikiem stanu toru na 28 odcinkach 100-metrowych {8}

2.2. Algorytmy obliczeń

Obliczenia niejednorodności parametrycznej wykonywano w celach próbnych dwiema metodami. W obu rozpoczynano je od podziału odcinka toru na $n = 10$ mikrosegmentów o długości 25 lub 30 m. Na każdym z nich, przy użyciu systemu SOHRON, oblicza się odchylenia standardowe nierówności pionowych σ_{zi} oraz różnic strzałek sąsiednich $\sigma_{\Delta f_i}$, gdzie $i = 1, 2, 3, \dots, 10$. Kolejne obliczenia prowadzono wg jednej z dwóch metod.

2.3. Metoda oparta na wskaźnikach zmienności

Metoda ta polega na wyznaczeniu wskaźników zmienności obliczonych odchylenia standardowych, co wymaga obliczeń ich wartości średnich $\bar{\sigma}_z$ i $\bar{\sigma}_{\Delta f}$ oraz odchylenia standardowych $\sigma_{\sigma z}$ i $\sigma_{\sigma \Delta f}$.

$$\bar{\sigma}_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_{zi} \quad (2)$$

$$\bar{\sigma}_{\Delta f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_{\Delta f_i} \quad (3)$$

$$\sigma_{\sigma z} = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\sigma_{zi} - \bar{\sigma}_z)^2 \right)^{0,5} \quad (4)$$

$$\sigma_{\sigma \Delta f} = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\sigma_{\Delta f_i} - \bar{\sigma}_{\Delta f})^2 \right)^{0,5} \quad (5)$$

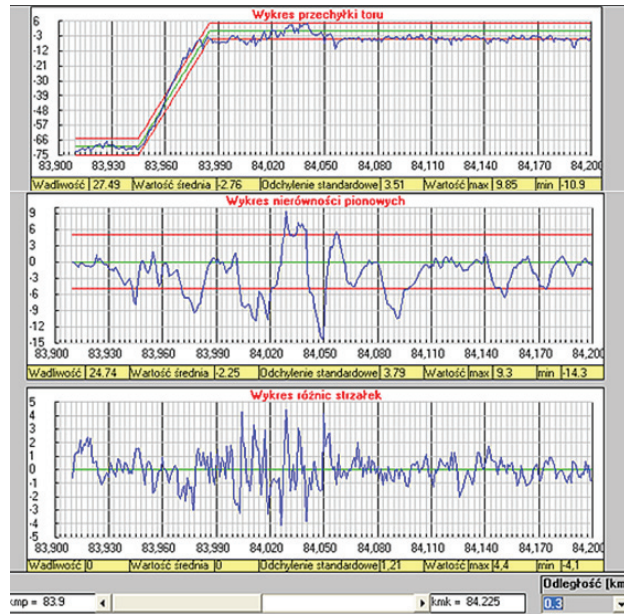
Miarą niejednorodności analizowanego odcinka toru jest średnia wartość wskaźników zmienności W_z oraz $W_{\Delta f}$, gdzie:

$$W_z = \frac{\sigma_{\sigma z}}{\bar{\sigma}_z} \quad (6)$$

$$W_{\Delta f} = \frac{\sigma_{\sigma \Delta f}}{\bar{\sigma}_{\Delta f}} \quad (7)$$

$$N = \frac{\frac{\sigma_{\sigma z}}{\bar{\sigma}_z} + \frac{\sigma_{\sigma \Delta f}}{\bar{\sigma}_{\Delta f}}}{2} \quad (8)$$

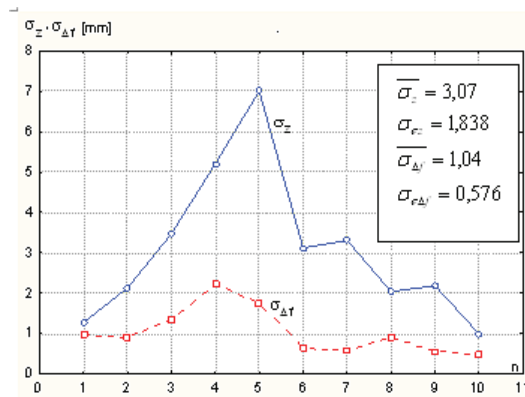
Zastosowanie tej metody przedstawiają dwa przykłady. Pierwszy dotyczy odcinka toru, którego wyniki pomiarów znajdują się na rysunku 3.



Rys. 3. Wykresy przedstawiające odcinek toru o dużej niejednorodności

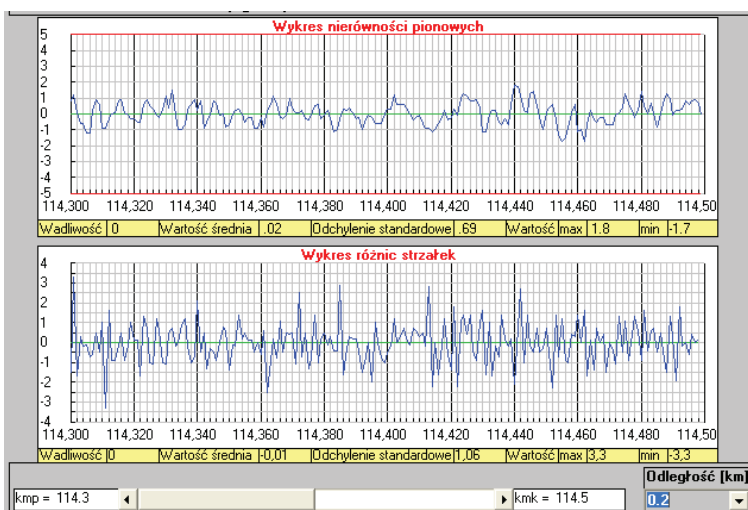
W lewej części tego rysunku jest uwidoczniony końcowy fragment łuku kołowego, dalej zaś rampa przechyłkowa i odcinek prosty. Największe nierówności pionowe i różnice strzałek sąsiadnych występują na odcinku toru prostego przyległego do końca krzywej przejściowej. Z rysunku tego wynika duża niejednorodność analizowanego odcinka toru. Podstawiając do wzoru (8) estymatory obu rozkładów, widoczne na rysunku 4, otrzymuje się

$$N = \frac{\frac{1,838}{3,07} + \frac{0,576}{1,04}}{2} = 0,58.$$



Rys. 4. Odchylenia standardowe na poszczególnych mikrosegmentach odcinka toru przedstawionego na rysunku 3 oraz ich estymatory

Drugi przykład odnosi się do toru, którego wyniki pomiaru przedstawia rysunek 5. Odchylenia standardowe poszczególnych mikrosegmentów tego odcinka są uwidocznione na rysunku 6 w kolumnach *Lista wartości*.



Rys. 5. Wykresy odcinka toru o małej niejednorodności

Pomiar 5 i 6		Wyniki	
Pomiar 5 Odch. stand. nier. pionowych		Pomiar 6 dch. stand.	
Liczba pomiarów: 10 Wartość nominalna: 0 Odchyłka maksymalna: 1,28 Odchyłka minimalna: 0,81 Wartość średnia: 1,06 Odchylenie standardowe: 0,14 Wadliwość: 100%		Liczba pomiarów: 10 Wartość nominalna: 0 Odchyłka maksymalna: 1,28 Odchyłka minimalna: 0,81 Wartość średnia: 1,06 Odchylenie standardowe: 0,14 Wadliwość: 100%	
Dopuszczalna odchyłka: <input type="text"/> górna: <input type="text"/> dolna: <input type="text"/> Wartość nominalna: <input type="text"/> Lista wartości: <input type="text"/> Numer: <input type="text"/> 10 Popraw <input type="button"/> Usuń <input type="button"/> Wstaw <input type="button"/> Wprowadź: <input type="text"/>		Dopuszczalna odchyłka: <input type="text"/> górna: <input type="text"/> dolna: <input type="text"/> Wartość nominalna: <input type="text"/> Lista wartości: <input type="text"/> Numer: <input type="text"/> 10 Popraw <input type="button"/> Usuń <input type="button"/> Wstaw <input type="button"/> Wprowadź: <input type="text"/>	
<input type="button"/> Wyniki 5		<input type="button"/> Wyniki 6	
<input type="button"/> Drukuj		<input type="button"/> Koniec	

Rys. 6. Obliczenia odchyleń standardowych w jednym z modułów SOHRONA odcinka toru przedstawionego na rysunku 5; prawa strona dotyczy różnic strzałek sąsiednich

Po wstawieniu otrzymanych estymatorów do wzoru (8) otrzymuje się

$$N = \frac{0,37 + 0,14}{\frac{0,75 + 1,06}{2}} = 0,31.$$

2.4. Metoda oparta na kwantylach

Niejednorodność nierówności pionowych i różnic strzałek sąsiednich w tej metodzie wyraża stosunek wartości średniej odchylenia standardowych dwóch górnych kwantyli do wartości średniej odchylenia standardowych z ośmiu pozostałych kwantyli. Średnia wartość obu niejednorodności parametrycznych jest przyjmowana jako niejednorodność analizowanego odcinka toru.

Założeniu temu odpowiada wzór:

$$N_z = \frac{4(\sigma_{zg1} + \sigma_{zg2})}{\sum_{i=1}^{10} \sigma_{zi} - (\sigma_{zg1} + \sigma_{zg2})} \quad (9)$$

gdzie:

- σ_{zg1} - największy kwantyl odchylenia standardowego nierówności pionowych,
- σ_{zg2} - drugi pod względem wartości kwantyl odchylenia standardowego nierówności pionowych.

Analogicznie oblicza się niejednorodność strzałek sąsiednich $N_{\Delta f}$. Niejednorodność nawierzchni jest zatem równa:

$$N = \frac{N_z + N_{\Delta f}}{2}. \quad (10)$$

Zastosowanie metody przedstawimy na tych samych przykładach, co poprzednio. Na pierwszym analizowanym odcinku (rys. 3) górne kwantyle odchylenia standardowych przedstawione na rysunku 4 wynoszą: $\sigma_{zg1} = 7,01$, $\sigma_{zg2} = 5,20$, $\sigma_{\Delta f_{g1}} = 2,24$, $\sigma_{\Delta f_{g2}} = 1,75$ mm. Sumy wszystkich odchylenia standardowych na 10 mikrosegmentach są równe odpowiednio:

$$\sum_1^{10} \sigma_{zi} = 30,75 \text{ mm},$$

$$\sum_1^{10} \sigma_{\Delta fi} = 10,39 \text{ mm}.$$

Z wzoru (10) wynika:

$$N_z = \frac{4(7,01 + 5,20)}{30,75 - (7,01 + 5,20)} = 2,63,$$

$$N_{\Delta f} = \frac{4(2,24 + 1,75)}{10,39 - (2,24 + 1,75)} = 2,49,$$

$$N = \frac{2,63 + 2,49}{2} = 2,56.$$

Podstawiając parametry drugiego odcinka toru (rys. 5 i 6) do wzoru (10) otrzymano:

$$N_z = \frac{4(1,63 + 0,78)}{6,46 - (1,63 + 0,78)} = 2,38,$$

$$N_{Af} = \frac{4(1,28 + 1,26)}{10,58 - (1,28 + 1,26)} = 1,26,$$

$$N = \frac{2,38 + 1,25}{2} = 1,82.$$

Porównując obydwie metody parametryczne można zauważyć, że metoda oparta na wskaźnikach zmienności bardziej zróżnicowała oba odcinki ($0,58/0,31 = 1,82$) niż metoda oparta na kwantylach ($2,56/1,82 = 1,41$). Porównując wykresy obu odcinków toru można stwierdzić, że wizualnie różnice niejednorodności odpowiadają bardziej stosunkowi 1,82 niż 1,41.

2.5. Obliczenia w metodzie opartej na syntetycznych wskaźnikach stanu toru

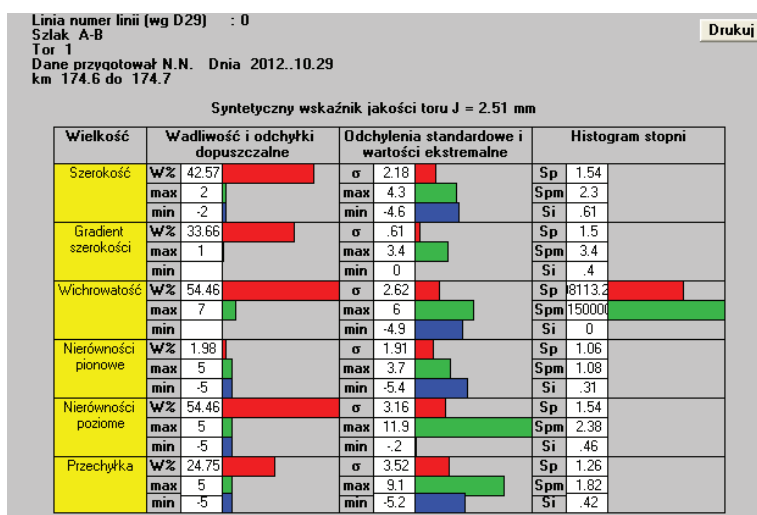
Syntetyczne wskaźniki stanu toru na poszczególnych 100 m odcinkach toru otrzymuje się korzystając z modułu *Zestawienia* w SOHRONIE (rys. 7).

Niejednorodność w postaci syntetycznej najprościej jest przedstawić za pomocą podstawowych estymatorów, tj. wartości średniej J , odchylenia standardowego σ_J , jego wartości ekstremalnych J_{max} i J_{min} oraz wskaźnika zmienności:

$$V_J = \frac{\sigma_J}{J} \quad (11)$$

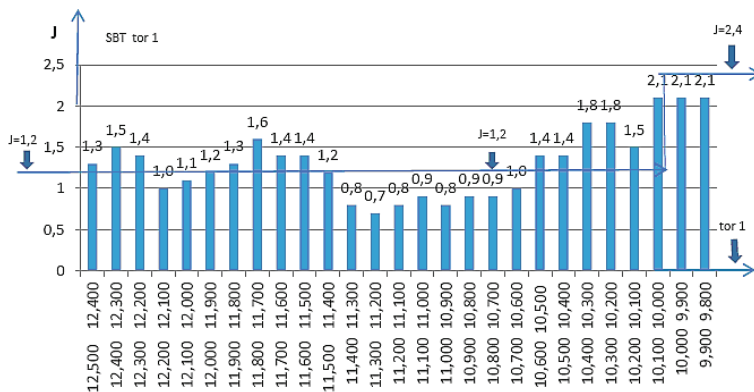
Niejednorodność geometryczna odcinka toru przedstawionego na rysunku 2 jest scharakteryzowana następującym zestawem liczb:

$$\bar{J} = 1,35 \text{ mm}, \quad \sigma_J = 0,195 \text{ mm}, \quad J_{max} = 1,8 \text{ mm}, \quad J_{min} = 1,1 \text{ mm}, \quad V_J = 0,14.$$



Rys. 7. Moduł zestawień pomierzonych nierówności toru z pokazaniem wskaźnika J

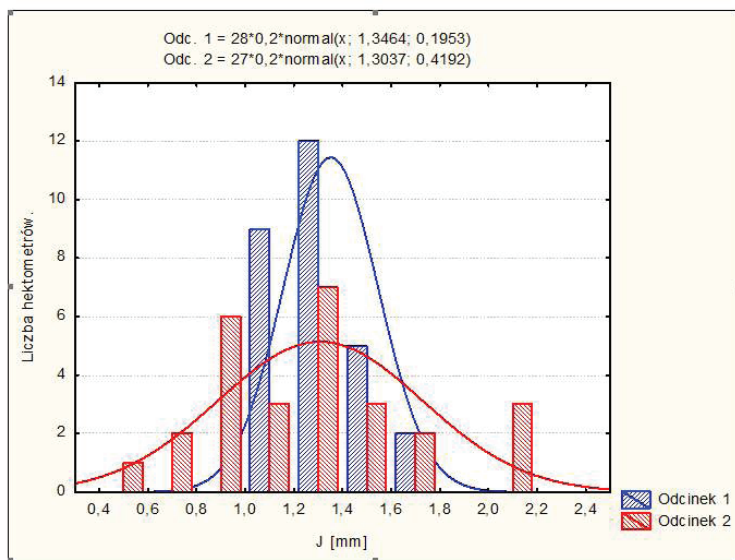
W celu porównawczym zamieszczono drugi odcinek toru (rys. 8).



Rys. 8. Niejednorodność nawierzchni kolejowej wyrażona syntetycznym wskaźnikiem stanu toru na 27 odcinkach 100-metrowych {8}

Jego charakterystyki są następujące:

$$\bar{J} = 1,30 \text{ mm}, \quad \sigma_J = 0,419 \text{ mm}, \quad J_{\max} = 2,1 \text{ mm}, \quad J_{\min} = 0,7 \text{ mm}, \quad V_J = 0,32.$$



Rys. 9. Histogramy i rozkłady wartości syntetycznych wskaźników stanu toru na porównywalnych odcinkach

Z porównania histogramów i rozkładów syntetycznych wskaźników stanu toru J na obu odcinkach (rys. 9) wynika, że przy prawie jednakowych wartościach średnich rozrzut wartości J na drugim odcinku jest znacznie większy. Ponad 2 razy większy jest też wskaźnik zmienności na drugim odcinku. Na uwagę zasługuje

duża dokładność robót w km $11,4 \div 12,7$, gdzie nie przekroczone $J = 1,0$ mm. Na pozostałych hektometrach dokładność ta była jednak mniejsza, przy czym takie wartości jak $1,9 \div 2,2$ w nowym torze, na którym nie ma rozjazdów, świadczą o złej jakości robót i powinny być przedmiotem dodatkowej analizy.

3. Wnioski

Obliczenia niejednorodności nawierzchni kolejowej, zwłaszcza oparte na syntetycznych wskaźnikach stanu toru na poszczególnych hektometrach linii, po zakończeniu robót modernizacyjnych, mogłyby stanowić cenne narzędzie podnoszenia ich jakości. Analiza dużego zróżnicowania stanu geometrycznego toru, w którym zastosowano jednakowe części składowe, powinna doprowadzić do odpowiedzi na pytania, z czego te różnice wynikają. Mając wyniki pomiarów, które powinny stanowić nieodłączną część dokumentacji przy odbiorach robót, wykonanie takich obliczeń nie jest trudne.

Z dużym prawdopodobieństwem można stwierdzić, że gdyby potencjalni wykonawcy ubiegający się o prowadzenie robót, musieli przedstawiać dokumenty świadczące o uzyskiwanych przez siebie wynikach jakościowych na poprzednich lokalizacjach i gdyby kryteria jakości znalazły należne im usankcjonowanie, przebieg procesów modernizacyjnych byłby znacznie sprawniejszy niż obecnie.

Literatura

- [1] Arkhangel'skij S.V. i in., Nove tehnologie v dyagnostike tehničeskikh obektov. Put i Putevoe Khozyajstvo 2009, nr 4.
- [2] Auerch L., Dynamics behavior of slab track on homogeneous and layered soils and the reduction of ground vibrating by floating slab track. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 136, iss. 8, August 2012.
- [3] Bałuch H., Badania i analiza niejednorodności nawierzchni kolejowej. Praca COBiRTK nr 30/37, Warszawa 1973, (publikacja w Pracach CO-BiRTK, z. 57, 1975).
- [4] Bałuch H., Zróżnicowanie odkształceń sprężystych nawierzchni S60. Przegląd Kolejowy Drogowy 1973, nr 9.
- [5] Bałuch H., An analysis of track parameter heterogeneity as complement to geometrical methods of track condition rating. Rail International 1974, No. 7.
- [6] Bałuch H., Zagrożenia w nawierzchni kolejowej – badania i przeciwdziałanie. Problemy Kolejnictwa 2013, z. 158.
- [7] Duży Słownik Języka Polskiego, Warszawa, 2011, PWN SA.
- [8] Garbacz K., Analiza jakości wykonania robót modernizacyjnych wybranego odcinka na podstawie wytycznych linii po modernizacji. Praca inżyn-

nierska WAT, wykonana pod kierunkiem K. Groblewskiego, Warszawa 2012.

- [9] Piotrowski J., Październiak P., Influence of dither generated by rolling contact on friction damping in freight wagons. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Dynamics and Mobility*. Vol. 48, Supplement 1, 2010.
- [10] Vestnitskij A.I., Metrikin A.V., Instability of a vibrating mass uniformly moving along a stochastically nonhomogeneous elastic track. *Mechanics of Solids* 1996, No. 5.