

# Wybrane problemy prognozowania zmian geometrycznych nawierzchni kolejowej

## Selected problems of forecasting geometric changes to railway superstructure



**Henryk Bałuch**

prof. dr hab. inż.

Institut Kolejnictwa

hbaluch@ikolej.pl



**Iwona Nowosińska**

mgr inż.

Institut Kolejnictwa

inowosinska@ikolej.pl

**Streszczenie:** Dążenie do racjonalizacji wydatkowania nakładów na naprawy nawierzchni i możliwość zaoszczędzenia kosztów cyklu jej życia tkwi między innymi w doskonaleniu metod planowania napraw nawierzchni kolejowej. Niezbędnym składnikiem planowania napraw nawierzchni jest prognozowanie jej zmian. Celem prognoz jest określenie w jakim terminie i zakresie naprawy te powinny być wykonane. Referat przedstawia najważniejsze etapy prognozowania zmian geometrycznych nawierzchni oraz stanowi wprowadzenie do opracowania ujednoliconej metody prognozowania. Zwrócono uwagę na problemy i złożoność zagadnienia prognozowania zmian nawierzchni kolejowej, które wymaga jeszcze wielu badań, w zakresie prognozowania zmian konstrukcyjnych oraz zmian stanu geometrycznego.

**Słowa kluczowe:** Nawierzchnia; Prognozowanie; Zmiany geometryczne

**Abstract:** The desire to rationalize expenditure for repairing superstructure and the opportunity to save the life cycle costs of superstructure may be noticed in perfecting methods of planning repairs of railway tracks. An essential component of planning superstructure repairs is forecasting its changes. The purpose of forecasting is to determine in what period of time and what kind of repair should be performed. The article presents the most important stages of forecasting changes to geometry of superstructure and an introduction to the development of a harmonized method of forecasting. It draws attention to the problems and the complexity of the issue of forecasting changes in superstructure, which still requires a lot of research in the field of forecasting structural changes and changes in geometry.

**Keywords:** Superstructure; Forecasting; Track geometry

Doskonalenie planowania napraw nawierzchni kolejowej jest przedmiotem twórczych poszukiwań w licznych krajach. W odpowiednich metodach planowania dostrzega się możliwości zaoszczędzenia kosztów cyklu życia, przy zachowaniu wszystkich wymagań, którym powinna odpowiadać konstrukcja nawierzchni. W planowaniu napraw, zwłaszcza przy ograniczonych nakładach, powinny znaleźć się m.in. elementy umożliwiające zastosowanie rankingu, jak to np. wprowadzono w pracy [3]. Kryteria kolejności napraw są również zawarte w opracowaniach [1,2].

Niezbędnym składnikiem planowania napraw nawierzchni jest prognozowanie jej zmian, którego celem jest wczesne określenie, w jakim terminie i zakresie naprawy te powinny być wykonane w nadchodzących okresach. Prognozowanie jest natomiast zbędne w

odniesieniu do torów o przekroczonych terminów napraw.

Pełne prognozy nawierzchni obejmują jej stan geometryczno-konstrukcyjny. Najczęściej jednak naprawy nawierzchni są wykonywane ze względu na przekroczenie granic stanu geometrycznego. Prognoza może dotyczyć też wąskiego zagadnienia. Przykładem takiego zagadnienia z zakresu konstrukcji rozjazdów jest prognoza uszkodzeń napędów zwrotnicowych [6]. Przykładem pracy, w której rozpatruje się tylko geometryczne cechy nawierzchni, wprowadzając 14 kryteriów (w tym cztery przypadki odchyłek szerokości toru) jest [5]. Dla tak określonych odchyłek opracowano oddzielne modele w funkcji obciążenia i liczby przejeżdżanych wagonów. Do oceny ryzyka zastosowano w tej pracy analizę przeżycia (survival analysis), przyjmując jako przeżycie brak

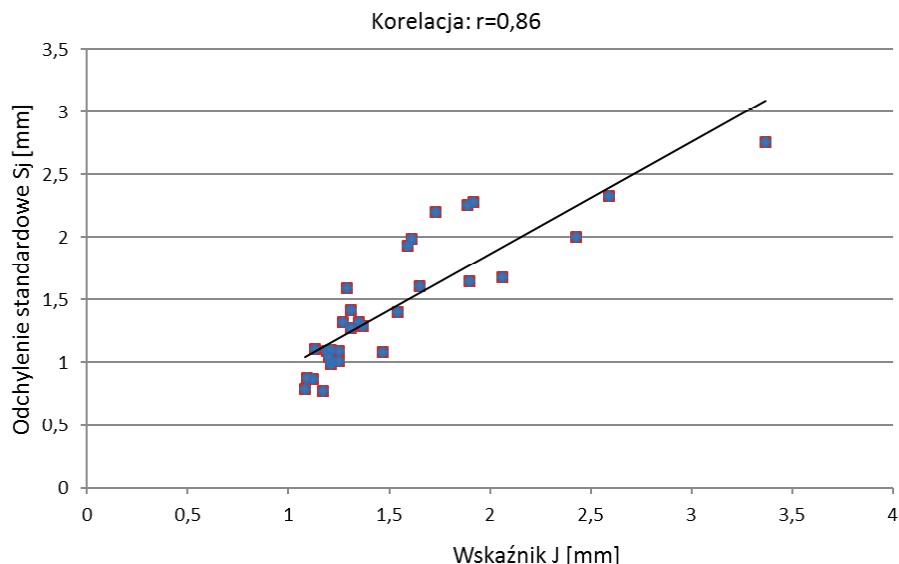
wykolejenia w okresie między dwoma kolejnymi wykolejeniami. Ważniejszymi etapami prognozowania zmian geometrycznych nawierzchni są:

- identyfikacja szlaku lub odcinka toru objętego prognozowaniem i wybór odcinka podobnego,
- ustalenie miary zmian stanu geometrycznego toru,
- określenie metody prognozowania i wykonanie obliczeń.

### Identyfikacja szlaku i miary stanu geometrycznego

Każdy odcinek toru, na którym analizuje się zachodzące zmiany (w miarę upływu czasu lub obciążenia) powinien być jednoznacznie scharakteryzowany. Charakterystyka ta powinna być uaktualniana po każdym cyklu prognozowania.

Charakterystyka toru obejmującego



1. Zależność regresyjno-korelacyjna między wskaźnikiem  $J$  i odchyleniem standardowym nierówności pionowych  $S_j$ .

jeden szlak lub dłuższy odcinek o zbliżonym stanie obejmuje:

- wartość średnią miary geometrycznej, np. syntetycznego wskaźnika stanu toru  $J$

$$\bar{J} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n J_i \quad (1)$$

- nieobciążone odchylenie standardowe

$$S_J = \left( \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (J_i - \bar{J})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

- współczynnik zmienności, czyli procentowe przeciętne zróżnicowanie badanej cechy

$$V_J = 100 \frac{S_J}{\bar{J}} \quad (3)$$

- przedział typowej zmienności

$$\bar{J} - S_J \quad \bar{J} + S_J \quad (4)$$

Stosowanie nieobciążonego odchylenia standardowego uzasadnione jest stosunkowo niewielką liczbą kilometrów toru na jednym szlaku. W przypadku bardzo krótkich szlaków odchylenie standardowe może być wyznaczane z rozstępu przy zastosowaniu współczynników konwersji [11].

Najczęstszymi naprawami nawierzchni są ciągle naprawy w postaci podbijania i nasuwania toru podbijarkami. Miarą geometrycznego stanu nawierzchni może tu być wspomniany już i ogólnie znany syntetyczny wskaźnik stanu toru lub odchylenie standardowe nierówności pionowych. Za przyjęciem syntetycznego wskaźnika stanu toru przemawia to, iż obejmuje on trzy wiel-

kości geometryczne, które zmieniają się podczas naprawy toru, tj. nierówności pionowe i poziome oraz wchrowatość. Zaletą odchylenia standardowego jest łatwość jego powiązania z prędkością pociągów. Przykładem zależności regresyjno-korelacyjnej między syntetycznym wskaźnikiem stanu toru i odchyleniem standardowym jest zależność (5) uzyskana z pomiarów odcinka toru eksploatowanego (rys. 1) w ciągu pół roku od wybudowania.

$$\bar{J} = 0,89S_J + 0,08, \quad r = 0,86 \quad (5)$$

## Zarys metod prognozowania

Znane są różne podziały metod prognozowania, m.in. można spotkać ich podział na trzy grupy. Pierwszą są metody heurystyczne oparte do doświadczeniach i opisywane niekiedy tylko lingwistycznie. Druga grupa to metody oparte na zbiorach danych dotyczących konkretnych obiektów. Stosowane są w nich modele znane ze statystyki matematycznej i badań operacyjnych. Do grupy trzeciej należą metody oparte na modelach opisujących trwałość i uszkodzenia konkretnych obiektów lub urządzeń. Spotyka się zalecenia metod heurystycznych łączących te grupy, zwłaszcza do określania czasu przeżycia (RUL – Remaining Useful Live).

Podziałem uwzględniającym głównie stosowane techniki jest podział metod prognozowania na metody matema-

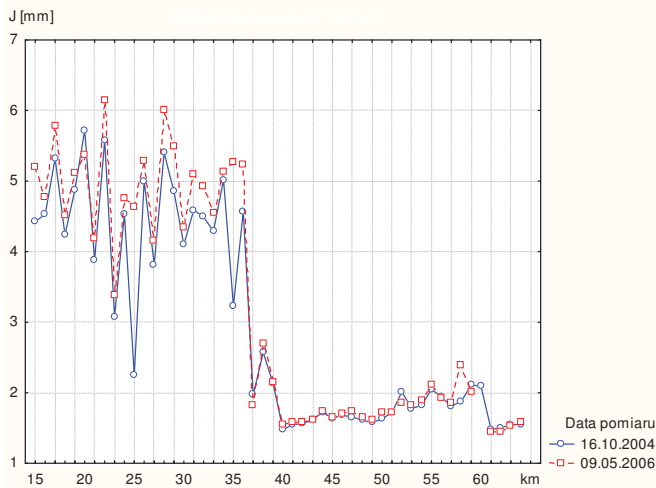
tyczno-statystyczne (ilościowe) i niematematyczne, tj. głównie jakościowe (heurystyczne), w których wykorzystuje się dane o dotychczasowym przebiegu procesów oraz wiedzę ekspertów. Podziały te są dalej rozwijane i tak metody matematyczno-statystyczne dzieli się na modele ekonometryczne i deterministyczne.

Prognozy dzieli się też pod względem zakresu czasowego. W prognozach krótkookresowych zakłada się istnienie tylko zmian ilościowych. Prognoza średniookresowa dotyczy okresu czasu, w którym występują zmiany ilościowe i ewentualnie, w niewielkim stopniu, zmiany jakościowe. Prognozy długookresowe odnoszą się do czasu, w którym zachodzą zmiany ilościowe i jakościowe. Można też spotkać inny podział, w którym granicami jest tylko czas i tak jako granice prognoz krótkookresowych przyjmuje się 4 miesiące, średniookresowych 2 lata i długookresowych ponad 2 lata.

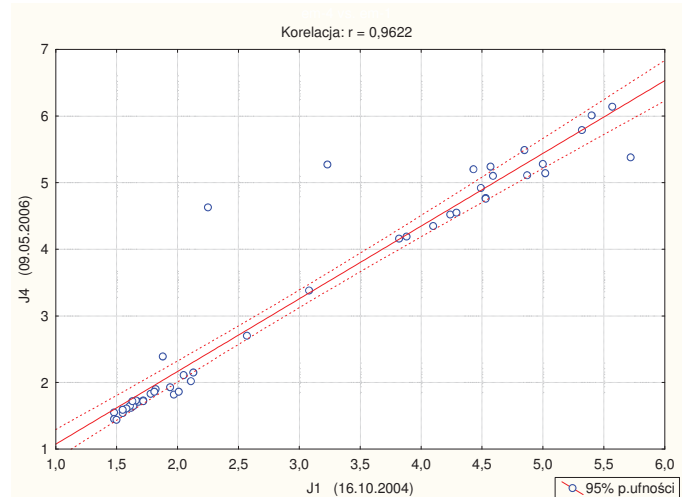
## Istota prognozowania zmian geometrycznych

Do opisu zachodzących zmian geometrycznego stanu nawierzchni nadają się empiryczne szeregi czasowe wspomnianych już miar, uzyskiwanych z pomiarów geometrycznych, wykonywanych drezyną pomiarową lub toromierzami elektronicznymi. Charakterystyczną cechą tych szeregów jest ich niewielka długość i tak np. przy dwuletnim cyklu napraw i dwóch pomiarach w ciągu roku, szereg czasowy opisujący zmiany niezależnie od długości szlaku lub dłuższego odcinka toru, czyli liczby członów, składa się tylko z czterech zbiorów wartości. Prawdopodobnie ta wymagała opracowania oryginalnej metody prognozowania.

Celem prognoz nie jest w tym przypadku delimitacja szeregów czasowych, tzn. wyodrębnianie wahań regularnych, wynikających z długookresowej tendencji rozwojowej trendu, z działań cyklicznych lub z wahań nieregularnych, lecz uzyskanie informacji ilościowej o stanie toru po określonym czasie. Krótkie szeregi czasowe ograniczają w istocie rzeczy ich wygładzanie przy zasto-



2. Wartości syntetycznych wskaźników stanu toru z dwóch pomiarów (źródło [4])



3. Zależność między syntetycznymi wskaźnikami stanu toru przedstawionymi na rysunku 2. (źródło [4])

sowaniu samej tylko średniej ruchomej, które nie jest zalecane nawet przy dłuższych szeregach [7]. Niewielka jest też przydatność zastosowania średniego tempa zmian, czyli wygładzania geometrycznego [8]

$$\hat{y}_g = n - 1 \sqrt{\frac{y_n}{y_1}} \quad (6)$$

Wartość ta zależy więc tylko od pierwszego  $y_1$  i ostatniego  $y_n$  członu szeregu czasowego i nie prowadzi do prognozy ilościowej. W tych warunkach do budowy prognoz przyjęto uśrednianie obliczeń z dwóch modeli. Pierwszy model polega na obliczaniu zależności regresyjno-korelacyjnej między  $J_i$  oraz jego kolejną wartością  $J_{i+1}$

$$J_{k(i+1)} = \alpha J_i + \beta, r, \quad (7)$$

gdzie  $\alpha$  i  $\beta$  charakteryzują równanie regresji,  $r$  jest zaś współczynnikiem korelacji. Zależność tę wykorzystuje się do prognoz w trzecim i w dalszych okresach pomiarów, tj do obliczeń wskaźników  $J_{p(i+2)}$ . Zależność między syntetycznymi wskaźnikami stanu toru na tym samym odcinku z różnych okresów pomiarów jest z reguły dość duża i zwykle tym większa, gdy stan tego toru jest dobry. Świadczy o tym rysunek 2, na którym tor na odcinku od km 37 do 64 jest dużo lepszy niż na odcinku od km 15 do 36. Na całej długości, tj. od km 15 do 64 współczynnik korelacji wyniósł 0,96, a duże różnice między kolejnymi pomiarami wystąpiły jedynie na 2. kilometrach (rys. 3).

Drugi model jest średnią ruchomą,

przy czym do prognozy trzeciego okresu składa się on dwóch wyrazów

$$\hat{J}_3 = \frac{J_1 + J_2}{2} \quad (8)$$

W czwartym i w dalszych cyklach drugi model będzie miał postać średniej arytmetycznej z trzech ostatnich pomiarów

$$\hat{J}_{i+1} = \frac{J_i + J_{i-1} + J_{i-2}}{3} \quad (9)$$

Wynikiem obliczeń na określonym kilometrze toru będzie wartość prognozowana

$$J_{pi} = \frac{J_{ki} + \hat{J}_i}{2} \quad (10)$$

Przykład obliczeń

Na określonym szlaku o długości 8,237 km obliczone syntetyczne wskaźniki  $J$  po 6 miesiącach od ostatniego podbicia wynosiły, jak podano w tab. 1. Są one częścią odcinka objętego prognozowa-

niem, mającego długość 47 km.

Z 8 - kilometrowego szlaku odrzucono 2 skrajne kilometry, na których z powodu znajdujących się na nich rozjazdów, wartości wskaźników  $J$  odbiegały zasadniczo od pozostałych.

Między pierwszym i drugim pomiarem na odcinku objętym prognozą, tj. na długości 47 km, uzyskano zależność, która będzie składnikiem wyznaczenia prognozy w trzecim okresie

$$J_{k3} = 1,22J_2 - 0,09, r = 0,75 \quad (11)$$

natomiast między drugim i trzecim pomiarem

$$J_{k4} = 1,08J_3 + 0,24, r = 0,64 \quad (12)$$

Pomiędzy trzecim, a czwartym pomiarem zależność wynosi

$$J_{k5} = 1,25J_4 + 0,10, r = 0,58. \quad (13)$$

Tab. 1. Zestawienie obliczeń dla 6 kilometrowego odcinka objętego prognozowaniem – przykład obliczeń

Km Pomiar J [mm]	134	135	136	137	138	139
$J_1$ z pierwszego pomiaru	2,57	2,14	2,06	1,08	1,59	1,92
$J_2$ z drugiego pomiaru	3,38	2,97	2,10	1,11	1,64	2,00
$J_{k3}$ pomiędzy pomiarem 1. i 2.	4,03	3,53	2,47	1,26	1,91	2,35
$\hat{J}_3$ średnia ruchoma z 1. i 2. pomiaru	2,98	2,56	2,08	1,10	1,62	1,96
$J_{p3}$ wartość prognozowana dla 3. pomiaru	3,50	3,04	2,28	1,18	1,76	2,16
$J_3$ z trzeciego pomiaru	3,63	3,12	2,30	1,27	1,83	2,20
$J_{k4}$ pomiędzy pomiarem 2. i 3.	4,16	3,61	2,72	1,61	2,22	2,62
$\hat{J}_4$ średnia ruchoma z 2. i 3. pomiaru	3,19	2,74	2,15	1,15	1,69	2,04
$J_{p4}$ wartość prognozowana dla 4. pomiaru	3,68	3,18	2,44	1,38	1,95	2,33
$J_4$ z czwartego pomiaru	3,67	3,14	2,46	1,31	1,96	2,35
$J_{k5}$ pomiędzy pomiarem 3. i 4.	4,69	4,03	3,18	1,74	2,55	3,04
$\hat{J}_5$ średnia ruchoma z 2., 3. i 4. pomiaru	3,56	3,08	2,29	1,23	1,81	2,18
$J_{p5}$ wartość prognozowana dla 5. pomiaru	4,12	3,55	2,73	1,48	2,18	2,61

## Zakończenie

Całość metody prognozowania zmian nawierzchni kolejowej obejmuje znacznie szerszy krąg zagadnień niż poruszono w tym referacie. Pomijając nawet prognozowanie zmian konstrukcyjnych, warto zauważyć, że istotnymi szczegółami w prognozowaniu zmian stanu geometrycznego, nie ujętymi w referacie, są m.in. metody prognoz długookresowych, ocena błędów prognozy, algorytm przejścia od prognozy do decyzji o konieczności naprawy, automatyzacja obliczeń oraz sposób prezentacji wyników i kilka innych.

Ujęcie całości tej problematyki wymaga jeszcze wielu badań, które już trwają. Ich wynikiem będzie ujednoczona metoda, która w istotny sposób może wpłynąć na racjonalizację nakładów na naprawy nawierzchni, a więc na najważniejszy składnik kosztów cyklu jej życia. ◀

## Materiały źródłowe

- [1] Bałuch H.: Kryteria określania kolejności napraw nawierzchni kolejowej. IV Seminarium Diagnostyczne, maj 2002.
- [2] Bałuch H.: Planowanie szlifowania szyn w torach kolejowych. Transport i Komunikacja 2008, nr 5.
- [3] Bałuch H.: Rankingowa kwalifikacja torów do profilowania szyn. X Konferencja „Nowoczesne technologie i Systemy Zarządzania w Transporcie Szynowym”, Zeszyty NT. SITKRP Oddział Kraków nr 96 (158), 2013.
- [4] Bałuch M.: Ocena zakresu robót nawierzchniowych z zastosowaniem systemu Sohron na przykładzie odcinka linii Zielonka-Białystok. Praca CNTK. temat 3072/11, Warszawa 2007.
- [5] Dingqing L., Holder J., Dwight C.: Implementing a tie degradation model for maintenance planning. Railway Track and Structures 2007, No 3.
- [6] Eker O.F. et al.: A simple static-based prognostic model for railway turnout systems. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 1019, vol 58, issue 5.
- [7] Hryniewiecki O.: Wykłady ze statystyki. Wyższa Szkoła Informatyki Stosowanej, Warszawa 2000.
- [8] Luszniwicz A., Słaby T.: Statystyka z pakietem komputerowym STATISTI-CATMPL. Teoria i zastosowania. Wydawnictwa C.H. Beck, 2001.
- [9] Schafer D.H., Barkan C.P.I.: A prediction model for broken rails and an analysis of their economic impact. Proceedings of AREMA Conference, 2008.
- [10] Tanaka H., Sano K., Miwa M.: Growth of rail corrugation and its prediction model. 13th International Conference Rail Engineering, Edinburgh, 2015.
- [11] Volk W.: Statystyka stosowana dla inżynierów. Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa 1973.

## REKLAMA



## Wielofunkcyjna maszyna HUDDIG w zastosowaniach robót kolejowych



Copyrights  
FPHU BAMAAR 2016