

HENRYK BAŁUCH¹⁾

MULTI-FACTOR METHOD OF COMPARISON OF THE GEOMETRICAL CONDITION OF RAILWAY TRACKS ON BRIDGES AND TESTS SECTIONS

WIELOCZYNNIKOWA METODA PORÓWNYWANIA GEOMETRYCZNEGO STANU NAWIERZCHNI KOLEJOWEJ NA MOSTACH I ODCINKACH DOŚWIADCZALNYCH

STRESZCZENIE. Artykuł przedstawia metodę porównywania geometrycznego stanu nawierzchni kolejowej w różnym czasie, w różnych miejscach z uwzględnieniem zjawisk współzależnych. Metoda ta polega na traktowaniu najważniejszych cech nawierzchni jako niezależne zmienne diagnostyczne i na wyrażaniu każdej z nich w skali centylowej przyjętej jako baza porównań. Zmienną zależną zaś jest interwał geometryczny. W ten sposób można znacznie wzbogacić opis stanu nawierzchni na odcinkach linii kolejowych, na których zmiany tego stanu wymagają dokładniejszej analizy, szczególnie pod kątem planowania napraw. Odcinkami takimi są tory na długich mostach oraz odcinki, na których prowadzi się badania nowych rozwiązań. Wybrane cechy nawierzchni uzyskuje się stosując diagnostykę znaną w praktyce eksploatacyjnej. Zastosowanie metody powinno ułatwić planowanie napraw nawierzchni na mostach oraz umożliwić porównanie wyników eksperymentów prowadzonych na różnych odcinkach doświadczalnych.

SŁOWA KLUCZOWE: mosty, nawierzchnia kolejowa, odcinki doświadczalne, planowanie napraw.

ABSTRACT. The paper presents a method of comparing the geometrical condition of railway tracks at different times, in different places and with interdependent phenomena. This method involves treating the most important railway track properties as independent diagnostic variables and expressing each of them on a centile scale assumed as the basis for comparisons. The dependent variable is the geometric interval. In this way, it is possible to significantly enrich the description of the railway track condition on sections of railway lines on which changes in their state require a more detailed analysis, especially in terms of repair planning. Such sections are tracks on long bridges and sections on which new solution are tested. Selected track characteristic are obtained using diagnostics known in operation practice. The application of the method should facilitate planning of railway track repairs on bridges and comparison of results of experiments carried out on different test sections.

KEYWORDS: bridges, railway track, repair planning, test sections.

DOI: 10.7409/rabdim.020.008

¹⁾ Instytut Kolejnictwa, ul. Chłopskiego 50, 04-275 Warszawa; artykuł wpłynął do redakcji 2020-01-24, Profesor zmarł 2020-03-08

1. WSTĘP

Rozwój diagnostyki nawierzchni kolejowej odbywa się w dwóch kierunkach: wprowadzaniu nowych urządzeń pomiarowych i opracowywaniu innowacyjnych metod oceny wyników pomiarów, ułatwiających utrzymanie oczekiwanego stanu. Przykładem nowej techniki upowszechnionej już w ostatnich latach na kolejach japońskich są urządzenia pomiarowe instalowane w wagonach pociągów pasażerskich, kursujących według normalnych rozkładów jazdy. Urządzenia te rejestrują i przesyłają wyniki pomiarów geometrycznych oraz obrazy części konstrukcyjnych do centrum gromadzenia danych [1].

W pracach związanych z metodami oceny wyników pomiarów i ich wykorzystaniem w utrzymaniu nawierzchni spotyka się modelowanie cykli napraw, np. podbijania podkładów [2], [3], modele prognoz nawierzchni [4] i metody oceny stanu torów [5]. W Polsce badania z tego zakresu dotyczyły w ostatnich latach potrzeb naprawczych nawierzchni kolejowej [6] i jakości napraw [7], [8].

W niektórych pracach daje się zauważyć dążenie do określania ogólnego stanu nawierzchni za pomocą jednej wielkości, tj. odchylenia standardowego nierówności pionowych S_z . Dlatego więc, np. wg [9] i [10] stan nawierzchni określa się jako:

- doskonały, gdy $S_z \leq 1$,
- dobry, gdy $1 < S_z \leq 2$,
- dostateczny, gdy $2 < S_z \leq 4$,
- niedostateczny, gdy $S_z > 4$.

Można przytoczyć dowody, że tak duże syntetyzowanie wielkości charakteryzujących nawierzchnię kolejową nie odzwierciedla wystarczająco jej stanu. I tak, z ostatnich analiz sił pionowych wywieranych przez wagon pomiarowy na tor przy prędkościach 160÷220 km/h, prowadzonych w Instytucie Kolejnictwa (z udziałem autora tego artykułu), wynika, że na wartości tych sił mają wpływ, oprócz nierówności pionowych, również wchrowatość toru i nierówności poziome²⁾.

2. CEL METODY

Teoria utrzymania nawierzchni kolejowej należy do nauk empirycznych nazywanych też naukami indukcyjnymi, tzn. uzasadniającymi twierdzenia głównie na podstawie rozumowania indukcyjnego. Indukcja niepełna, będąca jednym z podstawowych narzędzi nauk doświadczalnych, polega na

1. INTRODUCTION

The development of railway track diagnostics is progressing in two directions: introduction of new measurement devices as well as formulation of innovative methods for assessment of measurement data, facilitating maintenance of track in the required condition. An example of novel technology, already popularised in Japanese railways, is the use of geometry monitoring devices installed on passenger trains operating according to normal timetables. Such devices record the results of geometrical measurements as well as images of track structural components and transmit them to the data collection centre [1].

Research works devoted to methods of assessment of measurement results and their use in track maintenance cover such subjects as: repair cycle modelling (e.g. tamping) [2], [3], predictive maintenance models [4] and methods of track condition assessment [5]. In Poland research performed in this field in recent years encompassed track repair needs [6] as well as repair quality [7], [8].

In some research works there is a tendency to describe the general condition of the track using a single parameter, i.e. the standard deviation of vertical irregularities S_z . Therefore, in e.g. [9] and [10], the condition of structure is defined as:

- excellent, if $S_z \leq 1$,
- good, if $1 < S_z \leq 2$,
- sufficient, if $2 < S_z \leq 4$,
- insufficient, if $S_z > 4$.

There is evidence that such a high synthesis of the characteristic parameters does not sufficiently reflect the condition of the railway superstructure. The recent analyses of vertical forces applied by the track geometry recording car at the speeds of 160÷220 km/h (performed at the Railway Institute with participation of the author) have shown that these forces are influenced not only by the vertical irregularities, but by track twist and horizontal irregularities as well²⁾.

2. PURPOSE OF THE METHOD

Theory of railway structure maintenance belongs to empirical sciences, known also as inductive sciences, i.e. which statements are validated by means of inductive reasoning. Incomplete induction, being one of the basic tools

²⁾ Pomiary na dwóch liniach kolejowych wykonywali pracownicy Zakładu Dróg Kolejowych i Przewozów oraz Laboratorium Badań Taboru

²⁾ Measurements on two railway lines have been carried out by researchers of the Railway Track and Operation Department, and the Rolling Stock Testing Laboratory

uznaniu jakiejś ogólnej prawidłowości na podstawie skończonej liczby przypadków potwierdzających niektóre wystąpienia tej prawidłowości. Stosowanie indukcji niezupełnej oznacza, że wysuwane hipotezy należy sprawdzać na podstawie rzeczywistych wielkości uzyskiwanych z prowadzonych pomiarów i obserwacji lub czerpanych z baz, do których wprowadzono je wcześniej na podstawie tych samych źródeł. Wiele twierdzeń mających charakter prawdopodobny, z powodu konieczności potwierdzenia danymi empirycznymi musi długo czekać, by można było je uznać za pewne. Są też przypadki, gdy rozpatruje się kilka rozwiązań odnoszonych do tego samego zagadnienia, nie wiedząc, które z nich należy wybrać dopóki nie zgromadzi się wystarczającej ilości materiału porównawczego.

Wprowadzanie nowych rozwiązań w nawierzchni kolejowej wymaga, oprócz prac teoretycznych, symulacji komputerowych i badań laboratoryjnych, prowadzenia eksperymentów lub dłuższych obserwacji i systematycznych pomiarów na odcinkach doświadczalnych. W tym ostatnim przypadku zasadnicze znaczenie mają metody porównań wyników. Porównania te powinny wykazać:

- 1) różnice między rozwiązaniem badanym a normalnym torem, na którym zlokalizowano odcinek doświadczalny,
- 2) wpływ warunków eksploatacyjnych na nowe rozwiązanie, które można przedstawić poprzez rozmieszczenie odcinków doświadczalnych na różnych liniach kolejowych,
- 3) zmiany badanego rozwiązania pod wpływem narastającego obciążenia, upływu czasu i ewentualnych zmian środowiskowych.

Metoda porównań powinna być ustalona przed budową odcinków doświadczalnych i stosowana przez cały czas badań. Zastosowanie proponowanej metody wieloczynnikowej powinno ułatwić planowanie eksperymentów i ocenę ich wyników.

3. WYBÓR ZMIENNYCH DIAGNOSTYCZNYCH

Wybór zmiennych diagnostycznych w metodzie wieloczynnikowej został oparty na rozumowaniu indukcyjnym. Wybierając te zmienne kierowano się następującymi warunkami:

- 1) ich pozyskanie ma być możliwe przy zastosowaniu typowej techniki diagnostycznej,
- 2) można je wyrazić liczbowo na podstawie pomiarów lub ustalonych wzorców,
- 3) zmienne te powinny odzwierciedlać najważniejsze cechy nawierzchni,
- 4) część zmiennych powinna uwzględniać przydatność danego toru do stosowanej na nim maksymalnej prędkości pociągów,

of experimental sciences, consists in acceptance of a general schema based on a finite number of instances that support it. The use of incomplete induction is associated with the need to verify the formulated hypotheses against real values obtained from measurements, observations or bases containing past data from the same sources. Many probable statements are recognised as true only after a long delay due to the need to validate them based on empirical data. In some cases several probable statements regarding the same problem are considered before sufficient comparative material is collected to select one of them.

Introduction of new solutions in railway track structure requires - apart from theoretical work, computer simulations and laboratory testing - performance of tests, longer observations and systematic measurements on test sections. In such cases, the assumed methods of result comparison are of essential importance. The comparisons should display:

- 1) differences between the tested solution and a typical track on which the test section is located,
- 2) the influence of various operational conditions on the tested solution, which may be demonstrated by locating multiple test sections on different railway lines,
- 3) deterioration of the tested solution with time, growing load and possible environmental changes.

The method of comparison should be determined before the test sections are constructed and remain the same throughout the project. The use of the proposed multi-factor method should facilitate planning of tests and evaluation of their results.

3. SELECTION OF DIAGNOSTIC VARIABLES

Selection of diagnostic variables for the multi-factor method was based on inductive reasoning. The following requirements were assumed in their choice:

- 1) they should be recordable using typical diagnostic technologies,
- 2) they may be expressed as numerical values, based on measurements or established models,
- 3) the variables should reflect the most important properties of the track structure,
- 4) some of the variables should reflect the suitability of the given track for the assumed maximum speed,
- 5) the overall number of the variables should not surpass the user's perceptive potential in analysis of the associations between interrelated properties.

5) ich liczba nie powinna przekraczać możliwości percepcyjnych przy kojarzeniu znaczenia współzależnych cech.

Warunki te ustalono na podstawie intuicji, doświadczenia i dyskusji z osobami zajmującymi się utrzymaniem nawierzchni kolejowej. Warto zwrócić uwagę w tym miejscu na możliwość wykorzystania wybranych zmiennych diagnostycznych jako wskaźników w prognozowaniu stanu nawierzchni. Z zasady, w zdecydowanej większości metod prognozowania, praktyczna użyteczność wskaźników rozpoczyna się od sformowania ich szeregów rozdzielczych umożliwiających tworzenie trendów. W przypadku nawierzchni kolejowej praktyczne znaczenie mają już pierwsze zebrane wyniki na analizowanych odcinkach torów, bowiem umożliwiają one, poprzez strukturę rankingu, oszacowanie hierarchii koniecznych napraw.

Podkreślając możliwość wykorzystania zmiennych diagnostycznych nie tylko do celów porównawczych, należy z drugiej strony stwierdzić, że opracowana metoda nie jest przeznaczona do ustalania ograniczeń prędkości pociągów, ani do oceny ryzyka związanego ze stanem nawierzchni, do czego konieczna jest znajomość znacznie większej liczby atrybutów eksploatacji. To powoduje, że ustalenie granicy zagrożenia w nawierzchni kolejowej przy obecnym stanie wiedzy nie jest łatwe, bowiem zagrożone jest kategorią jakościową i dotychczas brak jest wystarczających miar liczbowych, którymi można by je obiektywnie wyrazić.

Wszystkie zmienne diagnostyczne w metodzie wieloczynnikowej zostały doprowadzone, w celach porównawczych, do skali centylowej tzn. od 0 do 100. Normalizacja ta jest oparta na zasadach heurystycznych. Skale, zasadniczo opisane algebraicznymi równaniami nieliniowymi, mają dla każdej zmiennej diagnostycznej inną postać funkcji centylowej. Starano się opracować je w taki sposób, aby narastające wartości charakteryzowały w przybliżeniu jednakowe oddalenie się danego parametru od stanu pożądanego. Wartość skali 100 oznacza, że w utrzymaniu nawierzchni przypadki takie nie powinny występować. Skalowanie obejmuje cztery zmienne diagnostyczne względne, tzn. będące funkcjami odchyłek dopuszczalnych, a więc pośrednio zależne od maksymalnej prędkości pociągów oraz pięć parametrów, które nie są zależne od tych odchyłek. Zmiennymi względnymi są:

- wadliwość W_z pionowych nierówności toru,
- wadliwość W_y poziomych nierówności toru,
- wskaźnik przekroczenia odchyłki dopuszczalnej nierówności pionowych c_z ,
- wskaźnik przekroczenia odchyłki dopuszczalnej nierówności poziomych c_y .

Zmienne te mogą przybierać wartości zerowe.

The above requirements were determined based on intuition, experience and discussions with track maintenance practitioners. It is noteworthy that the chosen diagnostic variables may be also utilised as indicators in structure condition prediction. As a rule, in vast majority of predictive models the practical usefulness of indicators starts with determination of frequency distribution intervals that enable observation of trends. In the case of railway structures, even the first set of results collected from the analysed sections has practical meaning, since it enables preparation of ranking and estimation of repair needs hierarchy.

Upon emphasizing the fact that the diagnostic variables may find broader use than only comparative purposes, it should be also stated that the developed method is not intended for determination of speed limits nor assessment of condition-related risk, which require the knowledge of many more operational attributes. Consequently, determination of limits of railway structure hazards is problematic at the current state of knowledge, since hazard is a qualitative category and it still lacks adequate numerical measures that would describe it in objective terms.

In order to enable their comparison, all the diagnostic variables in the multi-factor method were transferred to centile scale, i.e. from 0 to 100. This normalisation was based on heuristic principles. The scales – generally described by nonlinear algebraic equations – taken on a different centile function for each diagnostic variable.

The functions were formulated in such a manner that a particular increase in centile number reflects similar deviations of the parameters from the desired state. The value of 100 signifies a case that should not be permissible in track maintenance. The scaling encompasses four relative variables – i.e. ones that are dependent on permitted geometrical deviations and therefore are indirectly dependent on the assumed maximum speed limit – as well as five absolute variables that are independent of the acceptable deviations. The relative variables include:

- defectiveness of vertical irregularities W_z ,
- defectiveness of horizontal irregularities W_y ,
- exceeding factor of acceptable limit deviation of vertical irregularities c_z ,
- exceeding factor of acceptable limit deviation of horizontal irregularities c_y .

These variables may assume the value of 0 as well.

The independent parameters are as follows:

- standard deviation of vertical irregularities S_y ,

Parametrami bezwzględny są:

- odchylenie standardowe nierówności pionowych S_z ,
- odchylenie standardowe nierówności poziomych S_y ,
- syntetyczny wskaźnik stanu toru J ,
- maksymalna wichrowatość toru w ,
- przyspieszenie poprzeczne a w nadwoziu wagonu (pomierzone lub obliczone).

Wybór wymienionych zmiennych nie wyklucza możliwości uwzględniania innych specyficznych cech w porównaniach niektórych odcinków doświadczalnych, z tym, że nie będą one włączone do obliczeń syntetycznej miary skalowania zwanej interwałem geometrycznym.

4. CHARAKTERYSTYKA WYBRANYCH ZMIENNYCH

4.1. WADLIWOŚĆ

Wadliwością parametryczną W_x wielkości x (np. szerokość toru, wichrowatość, itp.) jest stosunek sumy długości odcinków toru, na których przekroczone są odchyłki dopuszczalne, do całkowitej długości ocenianego odcinka:

$$W_z = 100 \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{l_c}, \quad (1)$$

gdzie:

b_i – długość odcinka i ($i = 1, 2, \dots, n$), na którym przekroczone są odchyłki dopuszczalne wielkości x ,

l_c – całkowita długość ocenianego odcinka.

Za przyjęciem wadliwości przemawia łatwość ich określania. Z drugiej strony warto zauważyć, że brak jest jednoznacznej zależności między wadliwościami i oddziaływaniami dynamicznymi na tor. Wiadomo, że przy dobrym stanie nawierzchni wadliwość jest równa zero lub nieznacznie przekracza tę wartość. W nawierzchni o znacznym stopniu degradacji osiąga zwykle kilkanaście procent lub nawet więcej. Wartość wadliwości zależy jednak w dużym stopniu od przyjętych odchyłek dopuszczalnych i w pewnych przypadkach zaciemnia stan toru. Są bowiem zwolennicy rozszerzenia odchyłek dopuszczalnych, widzący w tym możliwość zmniejszania napraw nawierzchni. Można więc spotkać takie przypadki, że w torze z odchyleniami standardowymi nierówności pionowych S_z oraz poziomych S_y rzędu 5 mm, wadliwości nie przekraczają 0.5%. Wartość odchyłek standardowych świadczy więc o złym stanie nawierzchni. Powzięcie w tych warunkach decyzji o zaniechaniu naprawy na podstawie małej wadliwości może doprowadzić nawierzchnię do nieodwracalnych deformacji, czyli do stanu nienaprawialności.

- standard deviation of horizontal irregularities S_y ,
- synthetic track condition indicator J ,
- the maximum track twist w ,
- lateral acceleration a in the wagon body (measured or calculated).

Selection of the above variables does not exclude the possibility of incorporating other specific characteristics in comparisons of some test sections. They will not be, however, included in calculations of the synthetic measure of scaling termed the geometrical interval.

4. CHARACTERISTICS OF SELECTED VARIABLES

4.1. DEFECTIVENESS

The parametric defectiveness W_x of a given quantity x (e.g. track gauge, twist etc.) is the proportion of the sum of lengths of subsections where acceptable deviations are exceeded to the total length of the entire analysed section:

$$W_z = 100 \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{l_c}, \quad (1)$$

where:

b_i – length of the i^{th} subsection ($i = 1, 2, \dots, n$), at which the acceptable deviations of x are exceeded,

l_c – total length of the analysed section.

The appeal of defectiveness as a diagnostic variable lies in the ease of its determination. Nevertheless, it is noteworthy that there is no evident relationship between defectiveness values and the dynamic impacts that the track is subjected to. It is known that at a good structure condition the defectiveness is equal to 0 or relatively exceeds this value. For a significantly degraded structure it typically reaches 10-20%, sometimes even more. The values of defectiveness are, however, dependent on the assumed acceptable deviations, which may sometimes fog the issue. Since there are advocates of widening of the acceptable deviations, who perceive it as means to limiting the scope of repairs, one may encounter cases where a track with standard deviations of vertical and horizontal irregularities (S_z and S_y , respectively) reaching 5 mm will exhibit defectiveness values under 0.5%. Since the values of standard deviations imply unsatisfactory condition of the structure, decision about postponing the repairs based only on low defectiveness may lead to irreversible deformation of the structure, rendering it unsuitable for future repair. The defectiveness of both vertical and horizontal irregularities is transferred to the centile scale as shown in Fig.1. The relationship is described by the following equation:

Wadliwość obu nierówności toru odniesiona do skali centylowej jest przedstawiona na Rys. 1. Zależność tę opisuje równanie:

$$P_w = 0,47 W + 0,02 W^2. \quad (2)$$

Z założenia dotyczącego wszystkich zmiennych diagnostycznych przyjmuje się, że ich wartość przekraczająca skalę na osi odciętych odpowiada funkcji centylowej = 100, tak więc gdy $W > 60\%$, $P_w = 100$.

4.2. WSKAŹNIKI PRZEKROCZENIA ODCHYLEK DOPUSZCZALNYCH

Wskaźnik przekroczenia odchyłki dopuszczalnej jest stosunkiem największego bezwzględnego wymiaru z_{\max} lub y_{\max} , przekraczającego górną lub dolną odchyłkę dopuszczalną, do wartości tej odchyłki:

$$c_z = |z_{\max}| / z, \quad c_y = |y_{\max}| / y. \quad (3)$$

Skalę centylową wskaźników przekroczeń określa równanie (Rys. 2):

$$P_c = 6,4 c^2 + 1,7 c - 8 \quad (4)$$

Z założenia przy $c > 4$, $P_c = 100$.

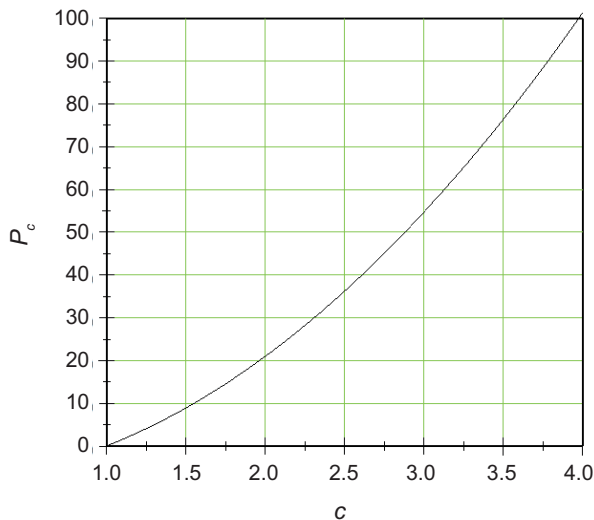


Fig. 2. Exceeding factors of acceptable deviations c on the centile scale P_c

Rys. 2. Przekroczenia odchyłek dopuszczalnych c w skali centylowej P_c

Duże znaczenie do przekroczenia odchyłki dopuszczalnej nierówności pionowych ± 3 mm przywiązywały koleje japońskie. Stosunek długości toru, na którym została przekroczona ta wartość, do całkowitej długości ocenianego toru traktowano jako wskaźnik syntetyczny [11]. Wskaźnik ten, będący w istocie rzeczą wadliwością tylko jednej nierówności toru, został uzupełniony później przez odchylenie standardowe tej

$$P_w = 0.47 W + 0.02 W^2. \quad (2)$$

For all the diagnostic variables the assumption is made that their values lying outside of the scale shall be reflected as the centile = 100, therefore if $W > 60\%$ then $P_w = 100$.

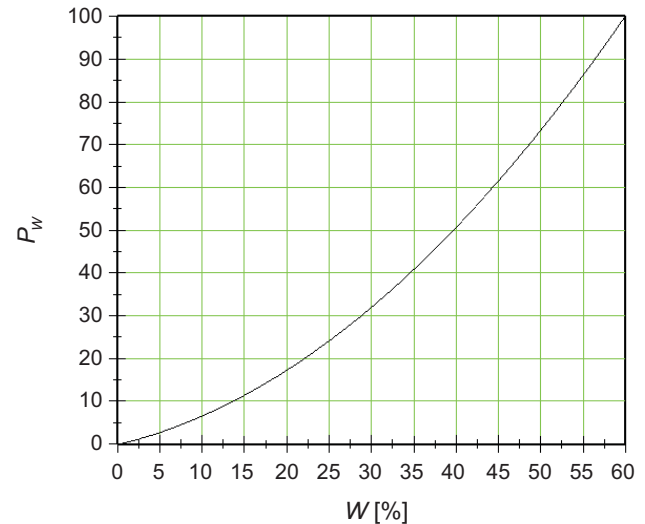


Fig. 1. Defectiveness W of vertical and horizontal irregularities on the centile scale P_w

Rys. 1. Wadliwość W nierówności pionowych i poziomych w skali centylowej P_w

4.2. EXCEEDING FACTORS OF ACCEPTABLE DEVIATIONS

The exceeding factor of acceptable deviation is the proportion of the greatest absolute value of z_{\max} or y_{\max} that exceeds the upper or lower acceptable tolerance limit to the value of the acceptable deviation:

$$c_z = |z_{\max}| / z, \quad c_y = |y_{\max}| / y. \quad (3)$$

The centile scale of the exceeding factors (Fig. 2) is defined by the equation:

$$P_c = 6.4 c^2 + 1.7 c - 8. \quad (4)$$

It is assumed that if $c > 4$, then $P_c = 100$.

The Japanese railways treated exceeding of the acceptable deviation of vertical irregularities of ± 3 mm as an important factor. The proportion of length of track subsections where the value was exceeded to the total track length was considered as a synthetic indicator [11]. This indicator, which was in fact initially equal to defectiveness of only one track irregularity, was later broadened with standard deviation and amplitude of the irregularity. The maintenance planning support system now employs the 3 parameters.

nierówności i jej maksymalną amplitudę. W systemie wspomagania planowania napraw stosuje się obecnie te trzy wielkości.

Wprowadzenie tej zmiennej diagnostycznej do celów badawczych (taki jest główny cel metody) może nasunąć wątpliwość, czy uzasadnione jest rozważanie przypadków, które oznaczają przekraczanie warunków formalnych, do których zalicza się również odchyłki dopuszczalne. Przekroczenia odchyłek dopuszczalnych w nawierzchni kolejowej są znane na różnych kolejach. Przypadki te powinny być oceniane pod kątem przyczyn, sposobów zapobiegania i usuwania skutków zdarzeń. Z drugiej strony należy jednak stwierdzić, że przekroczenie każdej odchyłki dopuszczalnej w nawierzchni nie powinno być utożsamiane z naruszeniem bezpieczeństwa jazdy, na co autor artykułu zwracał wielokrotnie uwagę w swych pracach i co w końcu znalazło potwierdzenie w dokumencie urzędowym³⁾. Jednym z licznych argumentów uzasadniających to twierdzenie jest fakt, że odchyłki dopuszczalne są ustalane (oprócz wchrowatości toru) na podstawie kryterium spokojności jazdy, które jest znacznie ostrzejsze niż kryterium bezpieczeństwa.

W rzadkich przypadkach przekroczenie odchyłki dopuszczalnej może być nawet wielokrotnością jej wartości. Przypadek taki przedstawia Rys. 3. Na tej linii prędkość maksymalna wynosi 140 km/h, co przy odchyłce ± 10 mm, oznacza $c_z = 4,18$.

4.3. ODCHYLENIA STANDARDOWE NIERÓWNOŚCI TORU

Odchylenia standardowe są bezwzględną miarą rozrzutu pomierzonych wyników stanu toru i niejednokrotnie, jak już wspomniano, można się spotkać z ich traktowaniem jako najważniejszej miary tego stanu. Wartości odchylenia standardowych wykorzystuje się w planowaniu napraw nawierzchni kolejowej w Danii. Opracowano tam model optymalizujący podbijanie podkładów z horyzontem do 4 lat [3]. Funkcja celu obejmuje m.in. zmiany degradacji toru wyrażone odchyleniem standardowym nierówności pionowych. Wprowadzenie do skalowania bezwzględnych miar stanu toru jest konieczne zwłaszcza ze względu na mniejszą wyrazistość miar względnych w przypadku zastosowania dużych odchyłek dopuszczalnych, co często występuje nie tylko przy mniejszych prędkościach pociągów.

Skalę centylową odchylenia standardowych nierówności pionowych i poziomych wyznacza równanie:

Incorporation of diagnostic variables based on exceeding of acceptable deviations (the primary objective of the proposed method) may raise doubts whether it is reasonable to include cases that do not fulfil the formal requirements - since acceptable deviations belong to such requirements. Exceeding of acceptable deviations is, however, noted in many countries. While such cases should be analysed in terms of their causes, preventive measures and repair methods, it should be also noted that - as has been often stated by the author in his works and finally confirmed in an official document³⁾ - a value exceeding the acceptable deviation is not to be automatically treated as a threat to ride safety. One of the various arguments in support of this statement is the fact that acceptable deviations (excluding track twist) are assumed based on the ride comfort criterion, which is much more rigorous than the safety criterion. On rare occasions the value exceeding the acceptable limit may be many times greater than the limit itself. Such an example is shown in Fig. 3. The maximum speed on the line equals 140 km/h, which, at the acceptable deviation of ± 10 mm, results in $c_z = 4.18$.

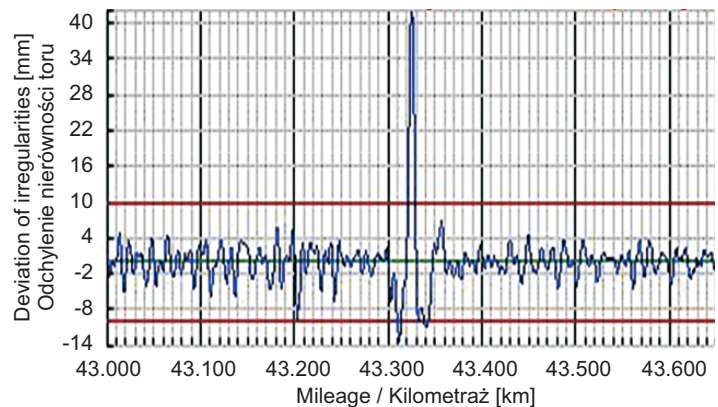


Fig. 3. A local value four times greater than the acceptable deviation (± 10 mm), in the form of a single impulse (41.8 mm) caused by a defect on the surface of the railhead
Rys. 3. Czterokrotne miejscowe przekroczenie odchyłki dopuszczalnej nierówności pionowych (± 10 mm) w postaci pojedynczego impulsu (41.8 mm), spowodowanego wadą na powierzchni główki szyny

4.3. STANDARD DEVIATION OF TRACK IRREGULARITIES

Standard deviation is an independent measure of variation of the obtained track condition results, and, as mentioned above, it is often treated as the most important parameter reflecting the track condition. Standard deviations are

³⁾ Tymczasowe warunki techniczne pomiarów i oceny jakości geometrii toru Id-1 Moduł D4. PKP PLK S.A. Warszawa 2018

³⁾ Temporary technical conditions for measurements and the quality assessment of the track Id-1 Module D4. PKP PLK S.A. Warsaw 2018

$$P_s = -1,07 S^2 + 23 S, \quad (5)$$

przedstawione w postaci graficznej na Rys. 4.

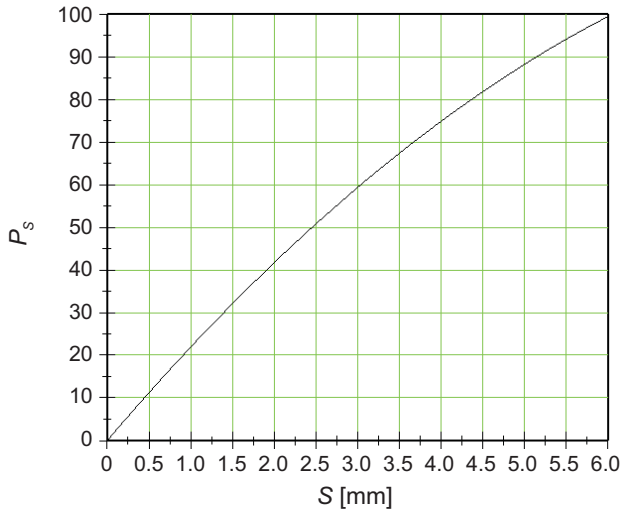


Fig. 4. Standard deviations S of vertical and horizontal irregularities on the centile scale P_s

Rys. 4. Odchylenia standardowe S nierówności pionowych i poziomych w skali centylowej P_s

4.4. SYNTETYCZNY WSKAŹNIK STANU TORU

Syntetyczny wskaźnik stanu toru jest funkcją odchyień standardowych czterech wielkości geometrycznych:

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

gdzie: S_z, S_y, S_w, S_e – odchylenia standardowe, odpowiednio nierówności pionowych, poziomych, wchrowatości i szerokości toru.

Wskaźnik ten, stosowany na PKP od blisko 30 lat [12], był użyty również w badaniach stanu nawierzchni na linii Lizbona - Porto, gdzie wynosił około 0.5 mm [5]. W Polsce po robotach modernizacyjnych jest on większy i waha się w granicach 0.7 ÷ 1.2 mm. W znaczeniu zmiennej diagnostycznej wskaźnik J będzie traktowany niezależnie od prędkości pociągów, ponieważ jego wartość jest oceną stanu geometrycznego zarówno toru przeznaczonego do prędkości 40, jak i 200 km/h.

Skalę centylową syntetycznego wskaźnika stanu toru przedstawia Rys. 5. Zależność tę wyraża równanie:

$$J = -1,1 J^2 + 22 J. \quad (7)$$

Fig. 5. Synthetic indicator of track condition J on the centile scale P_j

Rys. 5. Syntetyczny wskaźnik stanu toru J w skali centylowej P_j

used in railway track repair planning in Denmark, where a model has been created that enables tamping optimisation up to 4 years in advance [3]. The objective function encompasses, among other factors, the changes in track degradation expressed by standard deviation of vertical irregularities. Introduction of absolute measures in the condition scaling model is necessary particularly due to lower clarity of relative measures when high acceptable geometry deviations are assumed – which occurs frequently and not only at low train speeds.

The centile scale of vertical and horizontal irregularity standard deviations is defined by the equation:

$$P_s = -1.07 S^2 + 23 S, \quad (5)$$

presented in graphic form in Fig. 4.

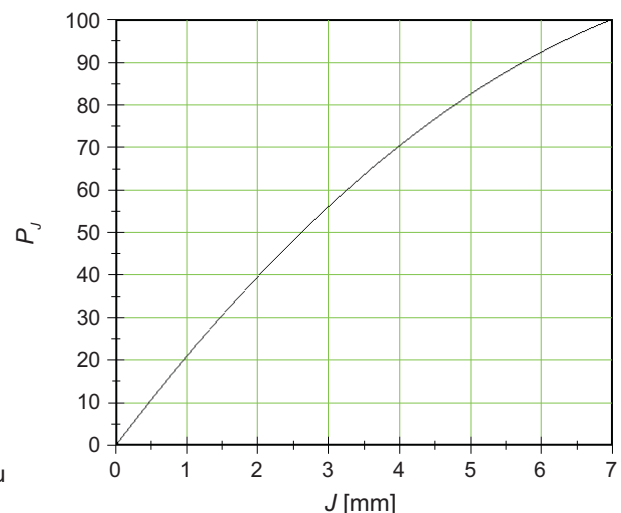
4.4. SYNTHETIC INDEX OF TRACK CONDITION

The synthetic indicator of track condition is a function of standard deviations of four geometrical quantities:

$$J = \frac{S_z + S_y + S_w + 0.5 S_e}{3.5}, \quad (6)$$

where: S_z, S_y, S_w, S_e – standard deviations of vertical irregularities, horizontal irregularities, track twist and track gauge, respectively.

This indicator, which has been used on the Polish railroads for nearly 30 years [12], was also used in track condition analyses on the Lisbon-Porto line, where it equalled approx. 0.5 mm [5]. In Poland after modernisation works the indicator is higher and ranges from 0.7 mm to 1.2 mm. As a diagnostic variable, the J indicator will be treated as independent of train speed, since its value is a measure of geometrical condition of tracks, the same for 40 km/h and 200 km/h.



4.5. WICHROWATOŚĆ TORU

Wichrowatość toru jest oceniana na podstawie jej wartości maksymalnej. Jest to uzasadnione dużym wpływem tego parametru na bezpieczeństwo jazdy. Według warunków [13] odchyłki te są uzależnione od prędkości pociągów, ale w istocie rzeczy wpływ tego parametru na bezpieczeństwo jazdy zależy w znacznie większym stopniu od charakterystyk wagonów, zwłaszcza zaś ich sztywności skrętnej w płaszczyźnie poprzecznej.

Znane są przypadki częstych wykolejeń w torach o wichrowatości 7‰ przeszywnionych wagonów krytych, przerobionych z węglarek, na których zamontowano dachy. Znany jest również wypadek wykolejenia tylko jednego próżnego wagonu w środkowej części pociągu na deformacji toru w łuku o wichrowatości 10‰ spowodowanej przez zwierzęta, które wykopały jamę w nasypie. Lokomotywa oraz wagony przed i za wagonem wykolejonym przejechały przez tę wichrowatość nie wykolejając się. W wagonie wykolejonym czop i gniazdo skrętu nie były smarowane⁴⁾. Spostrzeżenia te pozwalają rozpatrywać wpływ wichrowatości toru w skalowaniu jako wielkości niezależnej od prędkości maksymalnej i wyznaczyć skalę centylową bezpośrednio na podstawie wartości wyrażonej w promilach. Ustaloną zależność w promilach przedstawia Rys. 6 i równanie:

$$P_w = 1,4 w^2 + 4,6 w . \quad (8)$$

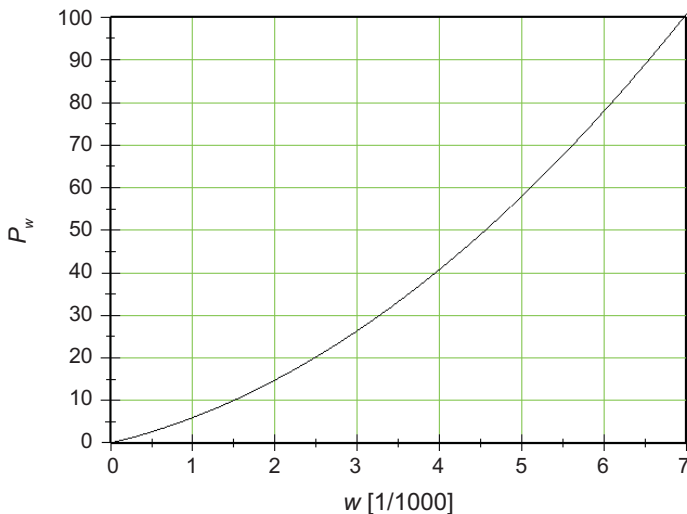


Fig. 6. Track twist w on the centile scale P_w
Rys. 6. Wichrowatość toru w w skali centylowej P_w

The centile scale of synthetic indicator of track condition is presented in Fig. 5. The relationship is given by:

$$J = -1.1 J^2 + 22 J . \quad (7)$$

4.5. TRACK TWIST

Track twist is evaluated based on its maximum value, due to high importance of this parameter for ride safety. According to the requirements [13] its acceptable limits are dependent on train speed, but in fact the impact of this parameter on safety is determined to a much greater degree by the characteristics of the wagons, and especially by their lateral rotational stiffness on curves

The author encountered cases of frequent derailings on tracks with a 7‰ twist - they involved overly stiff covered wagons, produced from old open hopper wagons fitted with roofs. There is also a known case of derailing of only a single empty wagon in the middle part of the train on a deformed section of a curve exhibiting twist of 10‰ due to a cavity dug by animals in the embankment. The locomotive as well as all the wagons running behind and ahead of the derailed wagon passed the twisted section without derailment. It was noted that the bogie centre plates and pivots of the derailed wagon had not been adequately lubricated⁴⁾. Such observations imply that the impact of track twist in the scaling may be considered as independent of the maximum speed - the centile scale may be therefore defined directly based on the twist expressed in permille. The determined relationship based on value in permille is shown in Fig. 6 and expressed by the equation:

$$P_w = 1.4 w^2 + 4.6 w . \quad (8)$$

When twist is measured in mm, in order to express it in permille it is necessary to divide it by the measurement base, which equals 5 m in Poland (in many countries the base is 3 m). In the developed software for synthetic scaling calculations track twist is entered in mm, and the value is automatically divided before equation (8) is applied.

4.6. UNBALANCED LATERAL ACCELERATION

The lateral acceleration on vehicle is the most important kinematic parameter defining the maximum speed on curves. On tangent track sections the lateral acceleration is influenced mainly by vertical irregularities and, to a slightly lesser degree, by track twist and cant. In the multi-factor method, the lateral acceleration may be treated generally as

⁴⁾ Furmanik K.: Analiza wypadku kolejowego. Opracowanie wykonane jako praca końcowa na szkoleniu diagnostów w Instytucie Kolejnictwa, Warszawa, wrzesień 2013

⁴⁾ K. Furmanik: The analysis of a railway accident. Elaboration carried out as the final work at analyst training at the Railway Institute, Warsaw, September 2013

4.6. NIEZRÓWNOWAŻONE PRZYSPIESZENIE POPRZECZNE

Przyspieszenie poprzeczne działające na pojazd szynowy jest najważniejszym parametrem kinematycznym określającym maksymalną prędkość w łukach. Na prostych odcinkach toru zależy głównie od nierówności poziomych i w nieco mniejszym stopniu od wchrowatości i różnic wysokości toków szynowych. W metodzie wieloczynnikowej przyspieszenie poprzeczne można traktować ogólnie jako parametr charakteryzujący oddziaływania dynamiczne pojazdu na tor. Przewidziano trzy opcje wprowadzania przyspieszeń poprzecznych. Pierwszą jest wprowadzenie maksymalnej wartości przyspieszenia masy usprężynowanej pojazdu szynowego, tj. wartości zarejestrowanej w nadwoziu.

W przypadku, gdy nie dysponuje się pomiarami przyspieszeń można je obliczyć w przybliżeniu, na podstawie założonej prędkości maksymalnej V_{\max} [km/h] oraz pomierzonych parametrów, tj. najmniejszego na analizowanym odcinku promienia R [m] łuku kołowego i przechyłki h [mm] wg wzoru:

$$a_2 = \frac{V^2}{12,96 R} - \frac{h}{153}. \quad (9)$$

Przyspieszenie a_2 na krzywej przejściowej oblicza się traktując ją jako łuk o promieniu równym dwukrotnej wartości promienia łuku, do którego przylega.

Trzecią opcją stosowaną zwłaszcza w torze prostym jest obliczenie przyspieszenia na podstawie pomiarów geometrycznych, tj. pomierzonych nierówności poziomych oraz różnic wysokości toków szynowych. Do tego celu służy wzór:

$$a_3 = 6,17 \cdot 10^{-4} (V^2 \cdot f) / c^2 \pm 6,54 \cdot 10^{-3} \cdot h, \quad (10)$$

gdzie:

f – strzałka nierówności poziomej, [mm],

c – baza pomiaru nierówności, [m].

Znak + przed ostatnim członem dotyczy przechyłki odwrotnej do pomierzonej krzywizny. Podczas całego okresu skalowania nawierzchni na konkretnym odcinku toru należy unikać zmiany sposobu wyznaczania przyspieszeń, gdyż wpłynie to negatywnie na śledzenie procesu narastania degradacji.

Wyniki przyspieszeń pomierzonych wprowadza się do skali centylowej według wzoru (Rys. 7):

$$P_a = 10 a^2 + 15 a. \quad (10)$$

Wyniki obliczeń wykonanych według wzorów (9) i (10), przed wprowadzeniem do wzoru (11) należy pomnożyć przez 1,95.

Fig. 7. Values of lateral acceleration a on the centile scale P_a

Rys. 7. Wartości przyspieszenia poprzecznego a w skali centylowej P_a

a parameter reflecting the dynamic impact of the train on the track. Three options of lateral acceleration input are possible in the method. The first is the input of maximum lateral acceleration of the sprung mass of the vehicle, i.e. the acceleration value registered in its body.

If there are no acceleration measurements available, an approximate value may be calculated from the assumed maximum speed V_{\max} [km/h], the measured lowest arc radius R [m] on the analysed section and its super-elevation h [mm] according to:

$$a_2 = \frac{V^2}{12,96 R} - \frac{h}{153}. \quad (9)$$

Acceleration a_2 on a transition spiral is calculated by treating the spiral as a circular arc with radius two times greater than the radius of the adjacent circular curve.

The third option, applied primarily to tangent track sections, is the calculation of lateral acceleration based on geometrical measurements, i.e. the measured horizontal irregularities and cant. In this case the following equation is used:

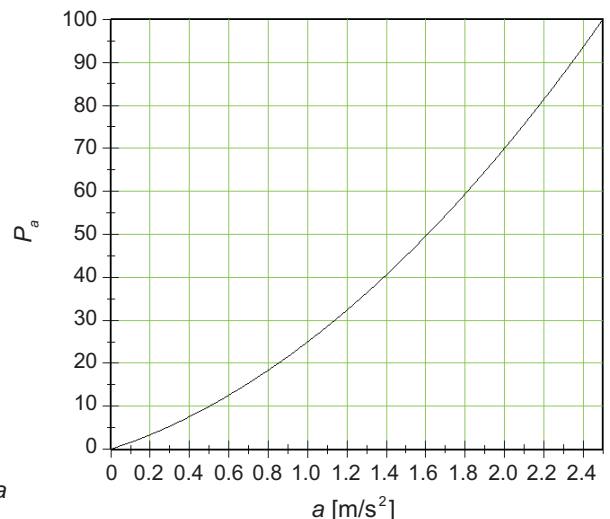
$$a_3 = 6,17 \cdot 10^{-4} (V^2 \cdot f) / c^2 \pm 6,54 \cdot 10^{-3} \cdot h, \quad (10)$$

where:

f – horizontal alignment irregularity (at mid-ordinate of the measurement base chord), [mm],

c – measurement base, [m].

The + sign before the last element occurs when the noted cant is negative in relation to the noted horizontal curvature. Changes between the three methods of determination of lateral acceleration should be avoided during the entire period in which track geometry scaling is performed on a given track section, as it may negatively affect the record of gradual degradation.



5. ODNIESIENIE ZMIENNYCH DIAGNOSTYCZNYCH DO WYBRANEGO PRZYPADKU

Nawierzchnia kolejowa przedstawiona na Rys. 8 nie jest dobrze utrzymana. Na pierwszym planie są widoczne nierówności pionowe w obu tokach szynowych, przy czym w toku lewym ich amplituda i długość są większe niż w toku prawym. Oznacza to, że na odcinku tym występuje również wchrowatość toru. Na drugim planie można dostrzec niewielkie uniesienie toru. Występują tu również krótkie deformacje pionowe zauważalne też w odbojnicach, co świadczy o złym stanie mostownic. Nierówności poziome, mniejsze od pionowych, uwidaczniają się w toku lewym na pierwszym planie, przy czym krzywizna szyny jest skierowana na zewnątrz toru, podczas gdy odbojnica jest wygięta do wewnątrz (w odległości ok. 4 m od złącza szynowego). Wymiar ten oparto na relatywnym szacowaniu nierówności toru, w konkretnym przypadku licząc śruby stopowe i przyjmując, że odległość między nimi wynosi 0.6 m. Na podobnej zasadzie można z grubsza oszacować strzałki nierówności, odnosząc je do wymiarów główki szyny (w przybliżeniu: 70 mm szerokość i 40 mm wysokość). Na tej podstawie oszacowano, że nierówności pionowe wynoszą około 30 mm, poziome zaś około 20 mm.



Podobne oszacowania są pomocne jedynie przy lingwistycznej (jakościowej) ocenie stanu toru i w konkretnym przypadku mogą tylko wesprzeć tezę, że stan nawierzchni na moście niekorzystnie wpływa na oddziaływania dynamiczne. Oszacowane deformacje nie wystarczą zwłaszcza do stwierdzenia przyrostu degradacji. Błędem byłaby też próba obliczania przyspieszeń poprzecznych na podstawie tak oszacowanych wymiarów. Można jedynie domniemywać, że gdyby skalowanie nawierzchni było znane i stosowane w czasie, gdy wykonano tę fotografię, to prawdopodobnie wysokie wartości skal poszczególnych zmiennych diagnostycznych i duża wartość interwału geometrycznego wpłynęłyby na szybsze

The obtained acceleration results are transferred into the centile scale according to the equation (Fig. 7):

$$P_a = 10 a^2 + 15 a . \quad (10)$$

If the equations (9) and (10) are used, the obtained acceleration values should be multiplied by 1.95 before they are entered in equation (11).

5. RELATING DIAGNOSTIC VARIABLES TO A SELECTED CASE

The structure shown in Fig. 8 has not been adequately maintained. In the foreground there are visible vertical irregularities of both rails, while in the left rail their amplitude and length are greater than in the right rail. It means that this section is also characterised by track twist. In the background a slight hump of the track may be noted. There are also short vertical deformations, noticeable in guard rails as well, indicating bad condition of the bridge sleepers. Horizontal irregularities, which are lower than vertical irregularities, are evident in the left rail - while the rail curves outwards, the guard rail curves inwards (approximately 4 m from the joint). The dimension is given based on approximate evaluation of irregularities; in this particular case by counting the fastening bolts and assuming a 0.6 m distance between them. Similarly, the irregularities may be roughly estimated through comparison to dimensions of the rail head (approximately: 70 mm in width and 40 mm in height). In this manner, the vertical irregularities are estimated as approx. 30 mm and horizontal irregularities as approx. 20 mm.

Fig. 8. Horizontal and vertical irregularities of the track on bridge sleepers (archival photograph from the Railway Institute collection)
Rys. 8. Nierówności poziome i pionowe toru ułożonego na mostownicach (fotografia archiwalna ze zbiorów Instytutu Kolejnictwa)

Such estimations are helpful only in linguistic (qualitative) assessment of track condition and in this particular case only serve to support the statement that the track condition on the bridge has negative influence on the dynamic effects. The estimated values are not sufficient for investigation of degradation changes. It would also be an error to calculate lateral acceleration based on such estimations. It may be only surmised that if structure scaling had been known and used at the time when the photograph was taken, the high scale values of individual diagnostic variables and high value of the geometrical interval would have influenced an earlier decision regarding track repair

podjęcie decyzji dotyczącej naprawy toru na tym moście. Inny przypadek dodatkowego wpływu stanu nawierzchni na wyężenie mostu stalowego rozpatrują autorzy pracy [14]. Szersze ujęcie dynamiki mostów kolejowych jest przedstawione w pracach [15] i [16].

6. MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA SKALOWANIA W NAPRAWACH NAWIERZCHNI

Planowanie napraw torów w obecnym okresie zmian klimatycznych [17], [18], [19] nabiera dodatkowego znaczenia. Dobry plan naprawy nawierzchni kolejowej to plan przewidujący jej wykonanie w odpowiednim czasie, miejscu i zakresie oraz z wymaganą jakością. Skalowanie nawierzchni obejmujące jej najważniejsze parametry geometryczne może stanowić uzupełnienie metod planowania napraw opartych na wskaźnikach syntetycznych, wzbogacając zwłaszcza ustalanie rankingu podbijania torów, a więc napraw najczęstszych. Oceniając przyjęty termin naprawy wymienia się częściej negatywne skutki napraw opóźnionych. Naprawy wykonywane przedwcześnie zdarzają się rzadziej, lecz i one powodują straty w eksploatacji oraz w środowisku. Każda przedczesna naprawa oznacza bowiem zbędny wydatek nieodnawialnej energii i emisję gazów cieplarnianych. Ponadto nawet w poprawnych procesach technologicznych następuje nieunikniona strata materiału – i tak np. przy podbijaniu podkładów ściernianiu ulegają ziarna tłuczni, przez co podsypka traci stopniowo swe walory, tzn. staje się wskutek zużycia ostrych krawędzi bardziej podatna na odkształcenia, a produkty ścierniania pogarszają jej odwodnienie.

Poprzez skalowanie naprawianego odcinka toru przed i po naprawie można uzyskać znacznie szerszy obraz skuteczności tej naprawy, a zatem wywierać wpływ na jakość robót. W przypadku stwierdzenia, że większość zmiennych diagnostycznych w wyniku podbijania toru nie uległa poprawie, warto przeprowadzić dodatkowe obserwacje, które powinny wyjaśnić przyczyny braku poprawy (zły stan podbijarki, niewystarczające kwalifikacje operatorów, trwałe deformacje torów itp.).

7. WYKORZYSTANIE SKALOWANIA W BADANIACH NAWIERZCHNI

Wprowadzenie skalowania cech nawierzchni będzie również przydatne w pracach badawczych, gdzie sposób wykorzystania wykonywanych pomiarów zależy w znacznym stopniu od inwencji prowadzącego badania i opracowanego każdorazowo programu badań, a ich synteza jest z reguły dość dowolna. Wady takiej procedury, głównie zaś – dowolność doboru

on the bridge. A different case of influence of track superstructure condition on loading of a steel bridge is described by the authors of [14]. A wider perspective of railway bridge dynamics is presented in [15] and [16].

6. POTENTIAL FOR USE OF SCALING IN STRUCTURE REPAIRS

In the face of the current climate changes [17], [18], [19], track repair planning is becoming even more significant than before. A good track repair plan determines the correct time, place and scope of the repair as well as ensures the required quality. Superstructure centile scaling, encompassing the most important geometrical parameters, may complement planning methods based on synthetic indicators and particularly enhance ranking of need for tamping, which is the most frequent procedure. When the assumed repair dates are evaluated, negative effects of delayed repairs are stressed more often. While premature repairs occur less frequently, they cause operational and environmental losses as well. Every early repair means a redundant expense of non-renewable energy and emission of greenhouse gases. Moreover, even correct technological procedures lead to inevitable losses of material – e.g. tamping results in gradual grinding of ballast particles and, consequently, in reduction of ballast quality (with less sharp edges the particles are more easily displaced) and deterioration of water drainage by fine products of grinding.

Centile scaling of the track section before and after the repair gives a better insight into effectiveness of the procedure, therefore enabling greater control over the quality of the works. If the majority of diagnostic variables does not improve after the repair, it may be advantageous to carry out additional observations in order to explain the causes behind the lack of improvement (bad condition of the tamping machine, inadequately qualified operators, permanent track deformations etc.).

7. USE OF SCALING IN STRUCTURE TESTS

The introduction of centile scaling of track parameters will be useful also in research works, where the manner in which measurement results are used and synthesised depends to a large degree on invention of the researcher and on an individually prepared research programme. The disadvantages of such procedures – including arbitrary choice of variables for comparisons of results from various test sections – may be especially vivid when the research is

zmiennych do porównań wyników z różnych odcinków doświadczalnych, mogą wystąpić zwłaszcza, gdy badania są prowadzone na wielu odcinkach w torach eksploatowanych, jak również na okręgu doświadczalnym w Żmigrodzie.

Pewne eksperymenty, jak np. mające wykazać skuteczność powlekania podsypki, wymagają wzbogaconej analizy porównawczej narastania odkształceń toru szczególnie w płaszczyźnie poziomej, co można osiągnąć analizując przyspieszenia poprzeczne, a tym samym rozszerzyć zakres powiązań tych odkształceń z prędkością. Taką potrzebę potwierdzają wyniki licznych prac badawczych prowadzonych w różnym czasie i w różnych miejscach.

Skalowanie oddzielnych wielkości charakteryzujących geometryczny stan nawierzchni kolejowej ułatwia wyciągnięcie pewnych wniosków szczegółowych i tak np. duże wartości odchylenia standardowego nierówności pionowych oraz wchrowatości wskazują na wyraźne odkształcenia toru w płaszczyźnie pionowej, co może być skutkiem złego odwodnienia, niewystarczającego zagęszczenia podłoża lub wad na powierzchni główki szyny. Duże odchylenie standardowe nierówności poziomych i znaczna wartość przyspieszenia poprzecznego mogą być skutkiem większych odkształceń toków szynowych w płaszczyźnie poziomej.

Zastosowanie skalowania nie wyklucza konieczności przeprowadzenia na niektórych odcinkach doświadczalnych eksperymentów czynnych i tak np. we wspomnianych już przypadkach badań skuteczności powlekania podsypki zachodzi konieczność sprawdzenia palności (również w warunkach poligonowych), przepuszczalności, rozmywania stoków podsypki i pomiarów oporu pojedynczych podkładów na przesunięcia poprzeczne w różnych temperaturach.

8. SYNTEZA SKALOWANIA

Ogólny geometryczny stan skalowanej nawierzchni kolejowej można przedstawić obliczając geometryczny interwał skalowania G , jako średnią arytmetyczną skal wszystkich zmiennych diagnostycznych, tj.:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}, \quad (12)$$

gdzie: n – liczba zmiennych diagnostycznych, w tym mających wartości zerowe, tj. 9.

W kolejnych pomiarach konkretnego odcinka toru należy porównywać nie tylko wartości interwałów, lecz wszystkie zmienne diagnostyczne. W planowaniu napraw ułatwi to zrozumienie przyczyn rozwijającej się degradacji i może stanowić dodatkowy czynnik określania ich hierarchii.

performed on many sections of tracks under operation as well as in the test track centre near Żmigród.

Some experiments, e.g. those focused on effectiveness of ballast bonding, require an in-depth comparative analysis of gradual geometry degradation, especially in horizontal plane, which may be achieved through analysis of lateral accelerations, thus expanding the scope of interrelations between geometry and speed. Such need has been confirmed in numerous research works performed at various times and in different places.

Scaling of individual quantities that characterise the track geometry may facilitate drawing of more detailed conclusions, e.g. high values of standard deviation of vertical irregularities and high twist imply deformations of track in vertical plane, which may be a result of inadequate drainage, insufficient sub-grade compaction or defects of rail running surface. High standard deviation of horizontal irregularities and considerable lateral acceleration may result from greater deformations in horizontal plane.

Using centile scaling does not supersede the need to actively perform other experiments on some test sections. For example, in the case of the aforementioned research of ballast bonding effectiveness, it is necessary to test flammability (also in field), filtration, ballast slope wash-out as well as resistance of individual sleepers to transverse displacement at various temperatures.

8. SYNTHESIS OF SCALING

The general geometrical condition of the scaled railway structure may be expressed by the geometrical scaling interval G , which is calculated as an arithmetic mean of the centile scales of all the diagnostic variables:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}, \quad (12)$$

where: n – the number of diagnostic variables, including those equal to zero, i.e. 9 in total.

After successive measurements on a given track section, comparisons should encompass not only the calculated geometrical intervals, but also all the individual diagnostic variables. This may improve the understanding of causes behind the observed degradation and may serve as an additional factor in determination of repair need hierarchy.

During research performed on test sections, special attention should be paid to those diagnostic variables that are expected to exhibit particular sensitivity to the introduced innovations. For example, in research devoted to new

W badaniach nawierzchni na odcinkach doświadczalnych dużą uwagę warto zwracać na te zmienne diagnostyczne, które w danym eksperymencie powinny wykazywać największą wrażliwość na wprowadzone innowacje. I tak np. w badaniach nowego podłoża oczekiwane zmiany powinny się ujawnić głównie poprzez odchylenie standardowe i wadliwość nierówności pionowych, wskaźnik J oraz wichrowatość toru, a w eksperymencie mającym na celu ocenę skuteczności powlekania podsypki duże znaczenie powinny mieć cechy charakteryzujące stan toru w płaszczyźnie poziomej.

9. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA

Zastosowanie metody przedstawia przykład odcinka doświadczalnego, na którym wykonano dwie serie pomiarów. Obliczenia wykonuje się przy użyciu programu mającego dwa moduły: moduł wprowadzania danych, w którym umieszcza się kolejne wyniki wszystkich zmiennych diagnostycznych w typowych dla nich jednostkach (Tabl. 1) i moduł obliczeń (Tabl. 2), w którym znajdują się wyniki skalowania⁵⁾.

sub-grade the expected changes should be visible mainly in the standard deviation and defectiveness of vertical irregularities as well as the J indicator and track twist; whereas in tests focused on ballast bonding effectiveness the parameters characterising the track geometry in horizontal plane should be more important.

9. EXAMPLE OF USE

The use of the proposed method may be shown on the example of a test section where two series of measurements were taken. The calculations are carried out using software with two modules: the data input module, where all the diagnostic variable results are entered using their typical units (Table 1), as well as the output module (Table 2), where the scaling calculation results are presented⁵⁾.

Table 1. Data input module for values of diagnostic variables
Tablica 1. Moduł wprowadzania wartości zmiennych diagnostycznych

Manual Instrukcja		Track superstructure scaling / Skalowanie nawierzchni kolejowej Data entry / Wprowadzanie danych							Results Wyniki		
Section specification Charakterystyka odcinka		Section No. 07, radius $R=900$ m, Superelevation $h=90$ mm / Odcinek nr 7, promień łuku $R=900$ m, przechyłka $h=90$ mm									
Test date Data badania	Vertical irregularities / Nierówności pionowe				Horizontal irregularities / Nierówności poziome				Indicator of track quality Wskaźnik stanu toru J	Track twist Wichrowatość toru w [mm]	Lateral acceleration Przyspieszenie poprzeczne p
	Defectiveness Wadliwość W_z	Maximum deviations Odchyłki max z_{max}	Permitted deviations Odchyłki dopuszczalne z	Standard deviation Odchylenie standardowe S_z	Defectiveness Wadliwość W_y	Maximum deviations Odchyłki max y_{max}	Permitted deviations Odchyłki dopuszczalne y	Standard deviation Odchylenie standardowe S_y			
2019-07-12	0.00	2.70	6.00	0.86	0.57	9.90	6.00	2.07	1.38	3.00	0.97
2019-11-08	4.60	8.00	6.00	1.17	8.00	10.20	6.00	2.40	1.73	3.90	1.10

Table 2. Module of scaling results
Tablica 2. Moduł wyników skalowania

Manual Instrukcja		Track superstructure scaling / Skalowanie nawierzchni kolejowej Calculation results / Wyniki obliczeń							Data Dane		
Section specification Charakterystyka odcinka		Section No. 07, radius $R=900$ m, Superelevation $h=90$ mm / Odcinek nr 7, promień łuku $R=900$ m, przechyłka $h=90$ mm									
Test date Data badania	Vertical irregularities Nierówności pionowe			Horizontal irregularities Nierówności poziome			Indicator of track quality Wskaźnik stanu toru J	Track twist Wichrowatość toru P_w	Lateral acceleration Przyspieszenie poprzeczne P_p	Geometrical scaling interval Geometryczny interwał skalowania G	Standard deviation Odchylenie standardowe P
	Defectiveness Wadliwość P_{wz}	Maximum deviations Odchyłki max P_{cz}	Standard deviation Odchylenie standardowe S_z	Defectiveness Wadliwość P_{wy}	Maximum deviations Odchyłki max P_{cy}	Standard deviation Odchylenie standardowe P_{sy}					
2019-07-12	0.0	0.0	19.0	0.3	12.2	43.0	22.1	4.0	62.2	18.1	21.8
2019-11-08	2.6	5.6	25.4	5.0	13.4	49.0	27.3	5.4	75.8	23.3	24.8

⁵⁾ Program obliczeń opracował Julian Bałuch

⁵⁾ Calculation programme developed by Julian Bałuch

Z porównań dwóch serii pomiarów wynika, że stan nawierzchni w tym okresie nie odbiegał znacząco od stanu pożądanego. Wyjątkiem są odchylenia standardowe nierówności poziomych, w pierwszym pomiarze o skali przekraczającej 40, w drugim zaś dochodzącej do 50. Zmienna ta charakteryzuje się też dużym przyrostem skali. Wynik ten można tłumaczyć tym, że budując ten odcinek doświadczalny wymieniono tylko podkłady i podsypkę, pozostawiając wcześniej ułożone szyny. Zauważalny przyrost skali wystąpił w przekroczeniu odchyłek dopuszczalnych nierówności pionowych (o 5,6), biorąc jednak pod uwagę nieduży przyrost odchyłek standardowych (0,31) można stwierdzić, że przekroczenia górnej granicy odchyłek nierówności pionowych miały charakter miejscowy. Przyspieszenia poprzeczne w obu seriach były obliczane na podstawie pomierzonych nierówności⁶⁾. Warto zauważyć, że gdyby obliczono je na podstawie układu geometrycznego, to ich wartość przy prędkości 100 km/h wyniosłaby tylko 0.27 m/s^2 .

Interwał geometryczny G rzędu 20 w obu seriach świadczy, że ogólny stan nawierzchni nie odbiega znacząco od stanu pożądanego. Odchylenia standardowe wyników wszystkich zmiennych P , przedstawione w ostatniej kolumnie Tabl. 2, mają charakter pomocniczy i przedstawiają rozrzut pomierzonych parametrów. Nie należy jednak utożsamiać ich z miarą niejednorodności nawierzchni.

10. WNIOSKI

Proponowane skalowanie, będące narzędziem ułatwiającym porównania różnych geometrycznych stanów nawierzchni kolejowej, nie zmniejsza znaczenia obowiązujących odchyłek dopuszczalnych zawartych w Warunkach [13] i w żadnej mierze ich nie zastępuje. Podobnie też górne granice skal, tzn. 100, nie powinny być traktowane jako granice bezpieczeństwa zagrażające wykolejeniem. Wykolejenie zależy bowiem od wielu innych czynników niż tylko stan toru, głównie zaś od stanu pojazdu szynowego, jego charakterystyk, prędkości pociągu, techniki jazdy itp. Niemały wpływ ma też koincydencja niekorzystnych wielkości występujących w torze i pojazdach szynowych.

Skalowanie, poza porównywaniem zmian będącym jedną z najważniejszych części analiz wyników badań, może, po niewielkim uzupełnieniu, okazać się przydatne w prognozowaniu stanu nawierzchni.

Comparison of the two measurement series implies that the condition of the structure in this period did not significantly depart from the desired state. The only exception is the standard deviation of horizontal irregularities, whose centile scale exceeded 40 in the first measurement and nearly reached 50 in the second. This variable also exhibited a significant increase on the centile scale. Such results may be explained by the fact that during the construction of the test section only ballast and sleepers were replaced, while the old rails were retained. A noticeable increase in scale was observed for the exceeding factor of acceptable deviations of vertical irregularities as well (by 5.6), but since the increase in standard deviations was relatively low (by 0.31), it may be stated that vertical irregularities exceeding the acceptable deviations occurred only locally. Lateral acceleration in both series was calculated based on the measured irregularities⁶⁾. It is noteworthy that if it had been calculated based on curve radius and its super-elevation, its value at the speed of 100 km/h would have equalled only 0.27 m/s^2 .

The geometrical interval G of approximately 20 in both series shows that the general condition of the super-structure does not deviate significantly from the desired state. The standard deviations of all variables P given in the last column of Table 2 are treated as auxiliary data and reflect the dispersion of the measured parameters. They should not be, however, treated as a measure of structure non-uniformity.

10. CONCLUSIONS

The proposed scaling method, conceived as a tool for comparison of different geometrical conditions of railway tracks, does not diminish the significance of the official acceptable deviations specified in the Technical Requirements [13] and is by no means intended to replace them. Similarly, the upper limits of the centile scales, corresponding to the value of 100, should not be treated as the limits of safety in terms of derailment. Threat of derailment depends on various factors, including primarily the technical state of the vehicle, its characteristics, speed, technique of the operator etc. Potential coincidence of unfavourable characteristics of track and vehicle is also of substantial importance.

Apart from comparison of changes in parameters, which is one of the most important aspects of test data analysis, the proposed scaling method – after minor extension – may prove useful in structure condition prediction as well.

⁶⁾ Obliczenia przyspieszeń w systemie SOHRON wykonał Andrzej Klonowski

⁶⁾ Calculations of accelerations in the SOHRON system carried out by Andrzej Klonowski

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Sakuma K., Takeda K., Sato J.*: Monitoring of track maintenance in pursuit of Condition Based Maintenance (CBM). *Japanese Railway Engineering*, **201**, 2018, 9-12
- [2] *Andrade R.A., Teixeira P.F.*: A Bayesian model to assess rail track geometry degradation through its life-cycle. *Research in Transportation Economics*, **36**, 1, 2012, 1-8
- [3] *Li R., Wen M., Salling K.B.*: A Predictive Maintenance Model for Railway Tracks. *Proceedings of IC-ARE 2015, International Congress on Advanced Railway Engineering*, 2015, 1-10
- [4] *Rui L., Wen M., Salling K.B., Nielsen O.A., Landex A., Madsen S.N.*: A predictive maintenance model for railway track. DTU - The Research Information System, Technical University of Denmark, 2015, 1-151
- [5] *Berawi A.R.B., Delgado R., Calcada R., Vale C.*: Evaluating track geometrical quality through different methodologies. *Journal of Technology*, **1**, 1, 2010, 38-47
- [6] *Bałuch H.*: Synteza potrzeb naprawczych i ich ranking. *Problemy Kolejnictwa*, **177**, 2017, 21-27
- [7] *Bałuch H.*: Determinanty wymian nawierzchni kolejowej. *Problemy Kolejnictwa*, **175**, 2017, 7-14
- [8] *Bałuch H.*: Improvement of methods for planning railway structure repair. *Railway Transport of Ukraine*, **4**, 2018, 20-26
- [9] *Sadeghi J., Askarenijad H.*: Development of improved railway track degradation models. *Structure and Infrastructure Engineering*, **6**, 6, 2010, 665-678
- [10] *Sussmann T.R. Jr, Thompson H.B., Stark T.D., Wilk S.I., Ho C.L.*: Use of seismic surface wave testing to assess track superstructure conditions. *Construction and Building Materials*, **155**, 2017, 1250-1255
- [11] *Onodera T.*: Decision making utilizing a large data set measured by track condition-monitoring device on a commercial service car. The 16th International Conference RAIL ENGINEERING, Glasgow 2015
- [12] *Bałuch M.*: Estymacja nierówności toru kolejowego. *Archiwum Inżynierii Lądowej*, 3-4, 1989, 399-412
- [13] *Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych Id-1 (D-1).* PKP PLK S.A., Warszawa 2005
- [14] *Chmielewski R., Muzolf P., Sancewicz S.*: Ocena życia technicznego wybranego mostu kolejowego. *Problemy Kolejnictwa*, **174**, 2017, 7-18
- [15] *Zobel H., Zbiciak A., Oleszek R., Michalczyk R., Mossakowski P.*: Numerical identification of the dynamic characteristics of a steel-concrete railway bridge. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **13**, 3, 2014, 275-301, DOI: 10.7409/rabdim.014.018
- [16] *Karaś S., Krasnowski A.*: Adjustment of the existing structures located on the trunk railway line CMK to accommodate high-speed rail (HSR) based on theoretical and experimental analyses. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **12**, 4, 2013, 385-410, DOI: 10.7409/rabdim.013.025
- [17] *Rymsza B.*: Wpływ zmian klimatycznych na bezpieczeństwo infrastruktury kolejowej. *Problemy Kolejnictwa*, **158**, 2013, 5-18
- [18] *Rail Transport and Environment Facts & Figures.* UIC/CER, Paris, September 2015, 1-68
- [19] *Bałuch H.*: Climate changes and energy consumption - examples associated with railway construction. *Railway Reports*, **183**, 2019, 77-82