

SKOJARZONE WARTOŚCI GRANICZNE W DIAGNOSTYCE NAWIERZCHNI KOLEJOWEJ¹

Henryk BAŁUCH
Instytut Kolejnictwa

W obecnym systemie utrzymania nawierzchni kolejowej opartej na ocenie jej stanu diagnostyka będzie odgrywać coraz większą rolę. Wprowadzając nowe urządzenia pomiarowe należy jednocześnie dostosowywać do nich odpowiednie wartości graniczne. Wartości graniczne powinny być skojarzone, to jest uwzględniające nakładanie się na siebie kilku czynników. Ocena nawierzchni będzie polegać na jednoczesnym analizowaniu wyników cyfrowych i obrazów jej elementów uzyskiwanych z kamer zainstalowanych na wagonach pomiarowych. Złożoność algorytmów tej oceny wymaga zastosowania odpowiednich programów komputerowych. Będą to programy hybrydowe, zawierające funkcje analityczne i reguły heurystyczne. W referacie scharakteryzowano kilka programów oceny ryzyka w nawierzchni kolejowej. Przedstawiono też koncepcję łączenia programów do oceny stanu toru z testerami, które mogą ułatwić ich stosowanie.

Słowa kluczowe: nawierzchnia kolejowa, diagnostyka, wartości graniczne.

1. WSTĘP

Znane są opracowania, w których rozwój diagnostyki nawierzchni kolejowej jest sprowadzony tylko do nowych narzędzi, urządzeń i pojazdów pomiarowych. Takie traktowanie diagnostyki jest niepełne i może doprowadzić do sytuacji, w których nowa technika pomiarowa, nawet sprawnie działająca, będzie miała tylko zastosowanie połowiczne, tj. dostarczy pomiarów, których nie można ocenić, odnosząc je do nieznanych dla mierzonej wielkości, odchyłek dopuszczalnych. Przypadek taki dotyczył, m.in. zautomatyzowanych pomiarów rozjazdów, dla których nie opracowano warunków granicznych.

Od zasady wprowadzania zmian w ocenie wyników pomiarów wraz z nowymi urządzeniami pomiarowymi są pewne wyjątki i tak np. unowocześnione toromierze, wchodzące do eksploatacji nie wymagają zmian odchyłek dopuszczalnych są to bowiem przyrządy mierzące wielkości znane i dokładnie zdefiniowane. Wprowadzając jednak pomiar przyspieszeń na łożyskach osiowych konkretnego pojazdu pomiarowego, które mają stanowić uzupełniającą ocenę stanu toru, nie powinno się

¹ DOI 10.21008/j.1897-4007.2017.25.01

pozostawiać interpretacji tych wyników poszczególnym osobom lub zespołom, bez dokładnego wyjaśnienia, jakie jest znaczenie określonych granic tych pomiarów.

Rozwoju diagnostyki nawierzchni kolejowej w końcowych latach drugiej dekady 21 wieku nie można rozpatrywać w oderwaniu od technologii cyfrowej, gdy moc komputerów w ciągu trzech lat wzrasta prawie 10 – krotnie, w ciągu zaś 10 lat blisko 1000 – krotnie, a na globie ziemskim liczba mobilnych urządzeń cyfrowych przekroczyła już liczbę mieszkańców. Rozwój technologii mobilnej, który obejmie również drogi kolejowe zapewni dostęp do danych i aplikacji, niezależnie od miejsca i czasu. To nie jest już wizja, lecz realne możliwości, wymagające, już obecnie prowadzenia odpowiednich badań i prac przygotowawczych.

Rola diagnostyki w systemie utrzymywania nawierzchni według stanu (*Condition Based Maintenance*) będzie wzrastać. System ten wymaga bowiem nie tylko dobrej znajomości stanu bieżącego nawierzchni, lecz również prognozowania stanu oczekiwanego, co najmniej w dwóch horyzontach czasowych – w czasie do najbliższego podbijania podkładów i w okresie do naprawy głównej. Opracowywanie prognoz powinno być oparte na dużych zbiorach wiarygodnych danych historycznych, co będzie wymagało opracowania odpowiednich baz danych.

2. DWA NURTY ROZWOJU DIAGNOSTYKI

Rozwój diagnostyki nawierzchni kolejowej powinien przebiegać w dwóch zharmonizowanych nurtach:

- tworzeniu nowych urządzeń, narzędzi i sprzętu pomiarowego,
- opracowywaniu metod oceny wyników pomiarów, dostosowanych do tej techniki z uwzględnieniem koincydencji, czyli nakładania się mierzonych wielkości na siebie.

Zadanie pierwsze jest głównie domeną wytwórców, drugie należy do kolei i jednostek badawczych. W rozwoju metod oceny wyników pomiarów wyłania się nowy etap. Jego istotą stanie się przejście od określania odchyłek dopuszczalnych pojedynczych wielkości do skojarzonych wartości granicznych. Zakres skojarzeń, czyli przestrzeń rozpoznawania będzie stopniowo powiększana, w miarę podejmowanych prac badawczych i gromadzonych doświadczeń [2].

Przykładem może być założenie miernika sił termicznych na szynie (rys. 1). Ograniczenie się tylko do ich rejestracji, w odstępach kilku minutowych, nie da wystarczającej informacji, kiedy i do jakiej wartości zmniejszyć prędkość pociągów w okresie upałów. Wartość graniczną tych sił należy więc określić uwzględniając geometryczny i konstrukcyjny stan toru oraz, w pewnym stopniu, również jego umiejscowienie (rys. 2).



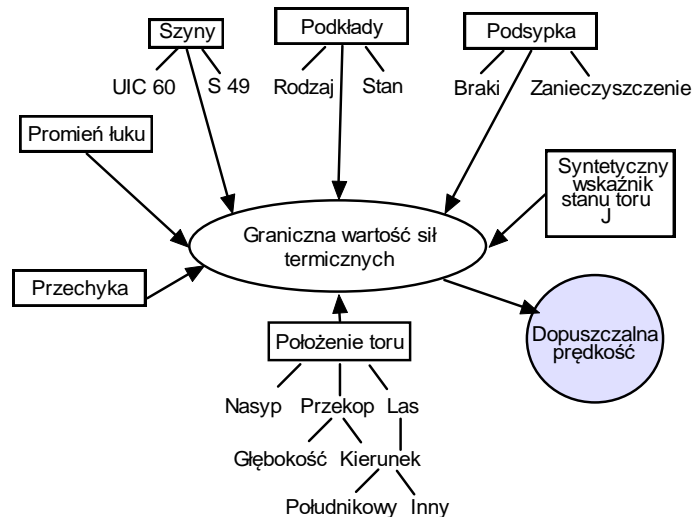
Rys. 1. Miernik naprężeń Geokon 400 z termistorem założony na jednej z linii kolejowych w Polsce [3]

Rozwój diagnostyki doprowadzi w niezbyt odległym czasie do układu, w którym wyniki pomiarów cyfrowych i obrazów uzyskiwanych z kamer zainstalowanych na pojazdach pomiarowych staną się normalnym zbiorem, który powinien być analizowany łącznie. Do tych podstawowych źródeł będą dochodziły stopniowo wyniki z urządzeń mobilnych i czujników instalowanych w torze. Warto też zauważyć, że oprócz pojazdów pomiarowych stosowane są na niektórych kolejach urządzenia pomiarowe w wagonach pasażerskich, kursujących w składzie normalnych pociągów, z których wyniki są wprowadzane w czasie realnym do serwerów, łącznie z dokładną lokalizacją każdego zarejestrowanego sygnału.

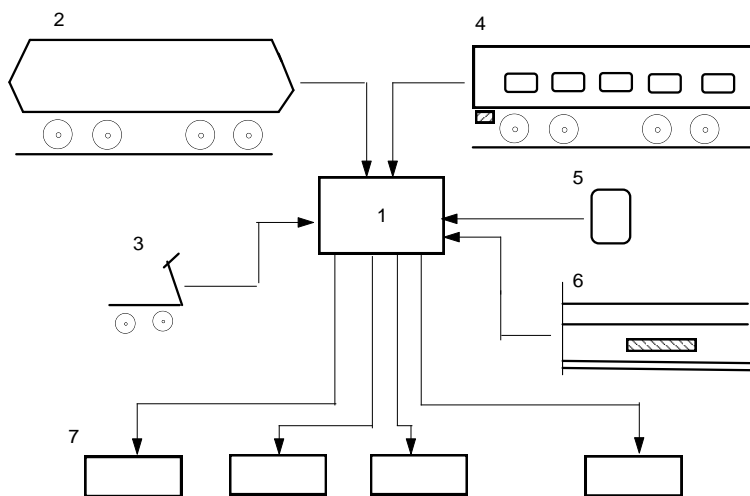
Pomiary takie są wykonywane, m.in. na liniach dużej prędkości w Japonii, które w roku 2014 obchodziły 50 rocznicę swego istnienia. Co 10 dni linie te są badane pociągiem pomiarowym zwanym *Doctor Yellow*, jednocześnie w sześciu wagonach pasażerskich włączanych do normalnych pociągów są zainstalowane urządzenia do pomiaru przyspieszeń. Pomiar przyspieszeń jest ważny ze względu na wykrywanie krótkich nierówności toru rzędu 6 m, powstających wskutek słabego podtorza [6]. Ta duża ilość pomiarów jest przesyłana do bazy o nazwie RINDA (*Relational and INtegrated DAtabase*), skąd przez automatyczne porównania pomierzonych wartości z wartościami granicznymi są wysyłane komunikaty do centrum planowania odpowiednich działań.

Interesujące przy tym jest to, że z kilkunastu przejazdów pociągu z urządzeniem pomiarowym na tym samym odcinku, z tą samą prędkością i w tym samym dniu, uzyskuje się nieraz znaczne zróżnicowanie wyników.

Duża ilość wyników pomiarów cyfrowych i obrazów nawierzchni może być spożytkowana tylko wówczas, gdy będą one gromadzone w odpowiednich bazach, przedstawiających stan obecny i dane historyczne oraz oceniane na podstawie skojarzonych wartości granicznych. Model tak zorganizowanej diagnostyki przedstawia rysunek 3.



Rys. 2. Wielkości i czynniki określające wartość graniczną siły termicznej w torze



Rys. 3. Docelowy model diagnostyki nawierzchni kolejowej w Polsce: 1 – baza danych, 2 – pojazdy pomiarowe, 3 – toromierze elektroniczne i inny sprzęt ręczny, 4 – urządzenia pomiarowe na wagonach w składzie normalnych pociągów, 5 – mobilne urządzenia ręczne, 6 – czujniki instalowane w torze, 7 – systemy komputerowe

3. OGÓLNE ZASADY OCENY STANU NAWIERZCHNI

Ocenę stanu nawierzchni według modelu przedstawionego na rysunku 3 można przedstawić symbolicznie według funkcji:

$$E = \left\{ \varphi_i \sum_{i=1}^{i=n} F_i + \gamma_j \sum_{j=1}^{j=m} G_j \right\}, \quad (1)$$

gdzie:

E – zdefiniowany stan nawierzchni,

F – wyniki cyfrowe wielkości $1, 2, \dots, n$,

G – obrazy elementów nawierzchni $1, 2, \dots, m$,

φ_i – funkcja, według której przekształca się wyniki cyfrowe wielkości i ,

γ_j – funkcja, według której obraz elementu nawierzchni j przekształca się na wynik cyfrowy.

Zastosowanie tej funkcji wymaga:

- sprowadzenia różnych wielkości fizycznych, wyrażanych cyfrowo do jednokowych porównywalnych miar,
- zamiany każdego obrazu na wynik cyfrowy według pewnej ustalonej zasady i sprowadzenia uzyskanej wartości cyfrowej również do porównywalnych miar,
- wyznaczenia pewnych skojarzonych wartości granicznych zastępujących odchyłki dopuszczalne oddzielnych wielkości.

Przy tych wymaganiach i konfiguracji diagnostyki przedstawionej na rysunku 3 konieczne stanie się zastosowanie dedykowanych systemów komputerowych oceny stanu nawierzchni. Wymaga tego duży zakres wyników cyfrowych i obrazów elementów nawierzchni, które powinny być rozpatrywane łącznie, co musi się odbywać według jednolitych algorytmów. Systemy te powinny dotyczyć pewnych wybranych i niezbyt szerokich zakresów zadań.

Ograniczenie zakresu każdego z takich systemów jest podyktowane staraniem o trafność podejmowanych decyzji, opartych na wynikach obliczeń. Niepewność decyzji podejmowanych w eksploatacji nawierzchni zależy bowiem, m.in. od zakresu, jakiego one dotyczą i tak np. łatwo jest ocenić konieczność wymiany szyn z powodu przekroczonego dopuszczalnego zużycia bocznego, do czego wystarcza znajomość odchyłek dopuszczalnych, trudniej zaś określić termin koniecznej naprawy głównej linii, na której odbywa się jeszcze ruch pociągów z prędkością 200 km/h i gdzie po przeniesieniu obciążenia 480 Tg, pojawiają się pierwsze oznaki rys w pokładach betonowych, wysuwanie przekładek oraz wychlapki.

4. KONCEPCJA SYSTEMÓW OCENY STANU NAWIERZCHNI POŁĄCZONYCH Z TESTERAMI

W wyniku przemyśleń autora nad scharakteryzowanymi zagadnieniami, powstała koncepcja nowych systemów oceny nawierzchni, połączonych z testerami. Byłyby to hybrydowe systemy, oparte na obliczeniach analitycznych i regułach heurystycznych, wzbogacone o moduły spełniające rolę testerów. Systemy te obejmowałyby wybrane problemy, trudne do diagnozowania ze względu na dużą liczbę wielkości, które mają wpływ na wynik końcowy oraz brak między większością z nich zależności opisanych analitycznie. Przykładem takiego systemu, według koncepcji autora, jest ORWET (akronim od **O**cena **R**yzyka **W**ybocz~~E~~**Ń** **T**oru). Ocena ryzyka jest w nim uzależniona od około 20 zmiennych, z których część jest przedstawiona na rysunku 2.

Przechodząc do drugiej cechy omawianych programów, tj. do ich łączenia z testerami, warto przypomnieć, że aplikacje zwane testerami są wykorzystywane w doskonaleniu wiedzy zawodowej, w określonej tematyce. Działanie testerów polega zwykle na losowaniu serii pytań z kilkoma wariantami odpowiedzi. Przykładem takiej aplikacji w budownictwie jest tester ułatwiający przygotowanie do egzaminu na uprawnienia budowlane.

Tester, który będzie połączony z systemem ORWET nie zawiera pytań, wymaga natomiast od użytkownika wylosowania wartości z kilku podstawowych zmiennych wprowadzanych do systemu. Zmienne te są tak dobrane, że w chwili losowania nie zachodzi jeszcze między nimi, żadna zależność. Pierwsze zadanie użytkownika po wylosowaniu takich wartości polega na doborze pozostałych zmiennych, niesprzecznych z danymi wylosowanymi, i tak np., jeśli wartością wylosowaną jest wiek podkładów betonowych 2 lata, a uczestnik wybierze procent podkładów do wymiany 25, to zasada niesprzeczności zostanie złamana.

Zbiór wartości losowanych może obejmować cały spotykany w praktyce obszar zmiennych, np. syntetyczne wskaźniki stanu toru od 0,4 do 10 mm. Wiedząc jednak, że do wybożenia nie dochodzi przy bardzo dobrym stanie toru można ograniczyć ten obszar, nie obejmując wartości charakteryzujących taki stan, tzn. rezygnując w konkretnym przypadku ze wskaźników mniejszych niż 2 mm.

Po wprowadzeniu wszystkich wartości, użytkownik wprowadza oszacowany przez siebie wynik, jaki jego zdaniem wykaże system i uruchamia go. Wyniki całej sesji są zapisywane, dzięki czemu można śledzić postępy umiejętności w ocenie różnych stanów nawierzchni kolejowej. Użytkowanie systemu obliczeń z odłączeniem go od testera jest również możliwe.

Zastosowanie takich testerów odpowiadałoby znanej chińskiej zasadzie nauczania, polegającej na zrozumieniu problemu przez doświadczenie. Dochodzenie do niej przedstawia się w postaci krótkich zdań:

- powiedz mi, a zapomnę,
- pokaż mi, a zapamiętam,
- pozwól mi zrobić, a zrozumiem.

Ćwiczenia na testerach połączonych z systemami obliczeń stwarzałyby możliwość rozwiązywania wielu przypadków, zarówno na salach wykładowych, jak i w zaciszu własnego pokoju. Porównania własnych konkluzji z wynikami obliczeń będą skłaniały użytkowników do głębszego analizowania stanu nawierzchni.

5. KORZYŚCI WYNIKAJĄCE Z SYSTEMÓW STOSOWANYCH W OCENIE NAWIERZCHNI KOLEJOWEJ

Ocena stanu nawierzchni kolejowej – konstrukcji inżynierskiej, od której w decydującym stopniu zależy bezpieczeństwo ruchu kolejowego, a jednocześnie konstrukcji bardzo kosztownej, nakłada na osoby oceniające dużą odpowiedzialność. Żaden system komputerowy nie zastąpi w tym działaniu wiedzy i doświadczenia człowieka. Może mu jednak w znacznej mierze pomóc, skłaniając do wzięcia pod uwagę pewnych czynników, które mogłyby ująć uwadze, lub które we wzajemnym powiązaniu mogą stanowić zagrożenie większe, niż każdy z nich rozpatrywany oddzielnie.

Doświadczenie uczy, że odpowiednio opracowane programy zmniejszają zagrożenie w sposób wyraźny. Można posłużyć się tu przykładem amerykańskiego programu do oceny ryzyka pęknięć szyn pod nazwą RailTest [7], wykorzystującego wyniki kontroli defektoskopowej i wiek szyn. Uwzględniając te cechy podzielono sieć kolejową na odcinki o różnym stopniu podatności na pękanie szyn i określono prawdopodobieństwo ryzyka w skali rocznej, w czterech wielkościach, tj. 0,001, 0,01, 0,03 i 0,06. Podział ten i idące za nim usprawnienia kontroli defektoskopowej na kolei Burlington Northern Santa Fe (BNSF), eksploatującej 40 tys. km torów, spowodowały zmniejszenie pęknięć szyn o 28% i wykolejeń spowodowanych tymi pęknięciami o 33%. W tym samym czasie na innych liniach, na których nie wprowadzono tych innowacji, oba wymienione wskaźniki wzrosły. Zastosowanie tego programu na kolejach w Szkocji przyczyniło się również do poprawy bezpieczeństwa.

Administracja rządowa w USA przywiązuje duże znaczenie do oceny ryzyka wyboczeń torów bezстыkowych [5]. Znane są tam dwie metody obliczeń tego ryzyka. W metodzie deterministycznej [7] uwzględnia się m.in. kategorię linii, rozstaw podkładów, typy szyn, historię dotychczasowych wyboczeń, historię prowadzonych napraw, rozmieszczenie opórek przeciwpelznych itp. Metodę tę zastosowano dzieląc szlaki na krótkie odcinki o długości 0,2 – 0,4 km. Wskaźnik ryzyka odpowiada ekwiwalentnemu wzrostowi temperatury ponad temperaturę neutralną. Na kolejach BNSF wyodrębniono ponad 130 tys. odcinków o średniej długości 300 m. Najwyższy wskaźnik ryzyka, ponad 80, przypisano 30 odcinkom (0,02% całości), duże ryzyko wyboczeń wyrażone wskaźnikiem 70 – 79 charakteryzowało 961 odcinków (0,72%). Na odcinkach tych przeprowadzono dodatkowe kontrole lub wykonano wyrównanie naprężeń.

W drugiej, probabilistycznej metodzie, zakończonej programem pod nazwą CWR-SAFE [4] jako zmienne wprowadza się m.in. temperaturę neutralną, opór po-

przecznym podkładów i amplitudę nierówności poziomych. Ryzyko wyraża się w skali 0 – 0,05. Dzięki zastosowaniu tych metod wyboczenia torów zmalały o 30 – 50%.

Program obliczeń ryzyka w eksploatacji infrastruktury, oparty na zbiorach rozmytych i wartościach lingwistycznych jest opisany w pracy [1]. Prawdopodobieństwo uszkodzeń jest oceniane w skali sześciostopniowej, od nieprawdopodobnego do częstego, skutki w skali czterostopniowej od małych do fatalnych i poziom ryzyka również w skali czterostopniowej od małego do dużego. Program drukuje funkcje przynależności.

6. PODSUMOWANIE

Rozszerzony zakres wyników oceny stanu nawierzchni kolejowej, obejmujący mierzone przyspieszenia i obrazy jej elementów, uzyskiwanych z kamer na pojazdach pomiarowych, powinien być analizowany we wzajemnym powiązaniu. Wymaga to zastąpienia pewnych stosowanych dotychczas odchyłek dopuszczalnych pojedynczych wielkości, skojarzonymi wartościami granicznymi. Ocena taka oparta na zależnościach analitycznych i regułach heurystycznych stanie się możliwa po opracowaniu i wdrożeniu odpowiednich programów komputerowych. Do tego zadania należy się już przygotowywać. Scharakteryzowane doświadczenia obce wskazują, że zagrożenia w nawierzchni kolejowej dzięki zastosowaniu odpowiednich programów można znacząco zmniejszyć.

System ORWET będzie należał do licznej grupy programów dotyczących ogólnie eksploatacji infrastruktury, które można zastosować również do obliczeń ryzyka. Są to programy z grupy CMMS (*Computerised Maintenance Management System*). Obszerny przegląd tych programów można znaleźć w pracy [8].

LITERATURA

- [1] An M., Lin W., Huang S.: An intelligent railway safety risk assessment support system for railway and maintenance analysis. *The Open Transportation Journal* No. 7, 2013.
- [2] Bałuch H.: Zasady oceny skojarzonych zagrożeń w nawierzchni kolejowej. X Konferencja Naukowo-Techniczna „Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym INFRASZYN, Zakopane, 2017.
- [3] Chmielewski R., Muzolf P.: Analiza pracy toru bezстыkowego pod obciążeniem termicznym. *Materiały Budowlane – Konstrukcje – Technologie – Rynek*, nr 3, 2017.
- [4] Kish A., Samavedan G.: Risk analysis based CWR track buckling safety regulations. (ntl.bts.gov/lib/17000/17600/17689/PB2001103170.pdf). Dostęp 2017.07.05).
- [5] Kish A., Samavedan G.: Track buckling prevention: theory, safety, concept and application. Federal Railroad Administration, Office of Research and Development, Final Report, Washington D.C., March 2013.
- [6] Miwa M.: 150 years of experience with ballasted track on the Tokaido Shinkansen. 20th Convention of The Working Committee on Railway Technology (Infrastructure) of the Austrian Society for Traffic and Transport Science (ÖVG), 2016.

- [7] Zarembski A.M., Palese J.W.: Managing risk on the railway infrastructure. WCRR Conference 2006.
- [8] Żółtowski M.: Strategia eksploatacji konstrukcji budowlanych. Wydział Zarządzania Uniwersytetu Techniczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, 2014.

ASSOCIATED LIMIT VALUES IN RAILROAD DIAGNOSTICS

Summary

In the current Condition Based Maintenance system of the railway track diagnostics will play an increasingly important role. When introducing new measuring devices, the appropriate limit values must be adjusted at the same time. Limit values should be associated, it is taking into account overlapping several factors. The assessment of the track will consist in simultaneously analyzing the digital results and figures of the track elements from the cameras installed on the measuring cars. The complexity of the algorithms of this assessment requires the use of appropriate computer programs. These will be hybrid programs containing analytical functions and heuristic rules. The paper presents several risk assessment programs in the railway track . The concept of linking programs to assessing the condition of the track with testers, which could facilitate their application, was also presented.

Keywords: railway track, diagnostics, limit values.

Dane autora:

Prof. dr hab. inż. Henryk Bałuch

Instytut Kolejnictwa

e-mail: hbaluch@ikolej.pl

telefon: +48 22 47 31 545