



Monitorowanie pojazdów i infrastruktury kolejowej przenośną wagą dynamiczną

KRZYSZTOF SEKUŁA,
DARIUSZ WIĄCEK, JERZY MOTYLEWSKI

ADAPTRONICA Sp. z o.o., ul. Szpitalna 32, 05-092 Łomianki,
ksekula@adaptronica.pl

Streszczenie. Tematem artykułu są wyniki badań i opis urządzeń, opracowanych i wykonanych w firmie Adaptronica, monitorujących obciążenia w transporcie kolejowym. Wagi dynamiczne zbudowane są na bazie przetworników mocowanych w sposób nieinwazyjny do stopki szyny, a identyfikacja obciążeń opiera się na pomiarze odkształceń szyny kolejowej wywołanych przejazdem pociągu. W artykule przedstawiono wyniki badań uzyskanych podczas monitorowania odcinków linii kolejowych, charakteryzujących się znaczną intensywnością ruchu pociągów. Określono histogramy wartości obciążeń osiowych badanych pojazdów. Rezultaty zweryfikowano w oparciu o wyniki pomiarów referencyjną wagą statyczną lub o pomiary przejazdów lokomotyw o znanej masie.

Słowa kluczowe: przenośna dynamiczna waga kolejowa, ważenie pojazdów w ruchu, monitorowanie infrastruktury kolejowej

DOI: 10.5604/01.3001.0013.9733

1. Wprowadzenie

Podstawową informacją niezbędną do oceny stanu technicznego elementów infrastruktury kolejowej jest znajomość działających na nie sił związanych głównie z ruchem pojazdów kolejowych. Bardzo istotnymi danymi, oprócz obciążeń statycznych, są zmienne w czasie obciążenia dynamiczne mające coraz większe znaczenie w czasie, gdy istnieją pociągi dużych prędkości. Informacje związane z globalnymi obciążeniami działającymi na elementy infrastruktury stanowią istotną przesłankę do określenia ich aktualnego stanu i żywotności konstrukcji. Do oceny tych wielkości istotnym elementem są systemy monitoringu, w których znajdują zastosowanie urządzenia służące do pomiaru i rejestracji obciążeń podczas normalnej eksploatacji badanych obiektów.

Ważenie w ruchu (WIM, ang. *Weigh-in-motion*) umożliwia oszacowanie masy pojazdów w czasie ich jazdy z prędkościami drogowymi. Możliwość estymacji masy i nacisków osiowych bez konieczności nakładania ograniczeń na ruch pojazdów jest istotną zaletą systemów WIM. Urządzenia tego typu są stosowane do monitorowania transportu samochodowego lub kolejowego. Ogólny cel ich zastosowania jest taki sam dla obu typów transportu, jednak techniczna realizacja metod pomiaru jest różna. Systemy ważące stosowane w transporcie kolejowym są bardzo zróżnicowane pod względem konstrukcyjnym.

Pierwsza grupa rozwiązań opiera się na pomiarze siły pionowej wywieranej przez koła pociągu na szynę i wymaga ingerencji w elementy infrastruktury kolejowej. W tego typu rozwiązaniach czujniki siły umieszczone są pomiędzy szynami kolejowymi a specjalnymi podkładami [1]. W innym podejściu budowa kolejowych wag pomostowych wymaga wprowadzenia żelbetonowego fundamentu, na którym wydzielony odcinek toru opiera się na czujnikach siły wspartych na tym fundamencie [2], co znacznie zwiększa koszt instalacji. Systemy tego typu charakteryzują się dobrą dokładnością, przy czym pomiar na ogół jest możliwy przy postojach lub niewielkich prędkościach poruszającego się pociągu.

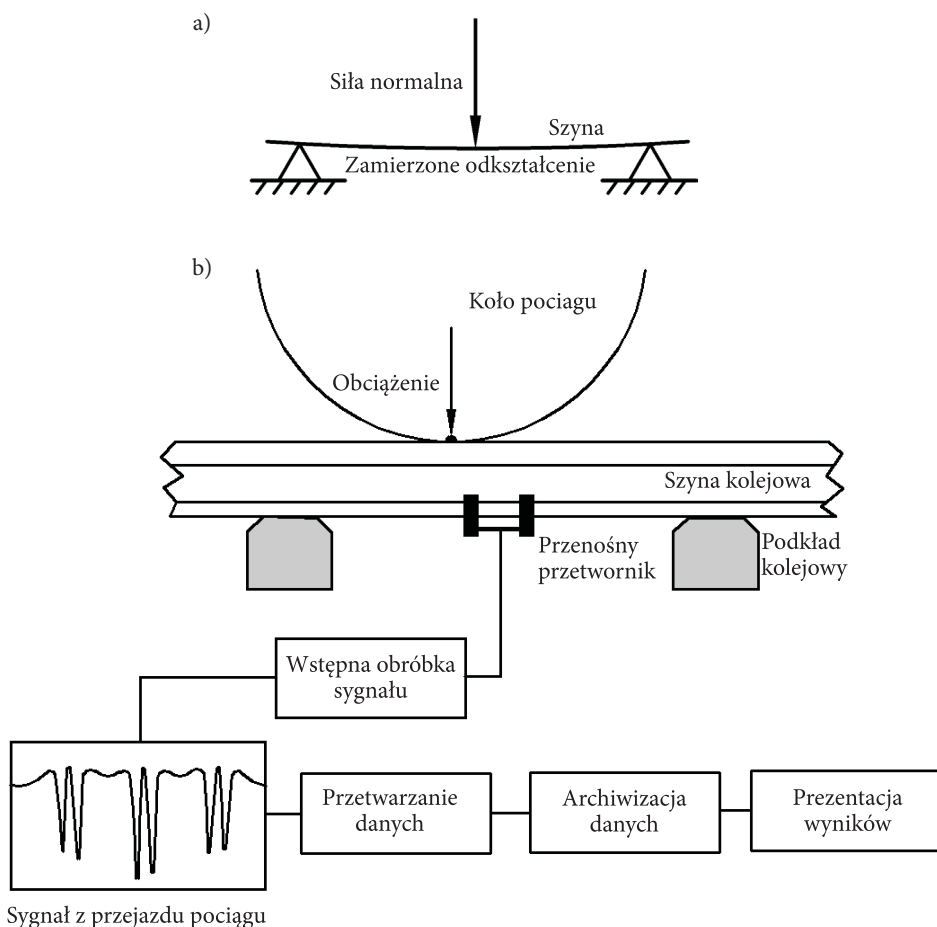
W przypadku drugiej grupy rozwiązań sposoby określania obciążeń kolejowych nie wymagają istotnych prac związanych z modyfikacją istniejącej infrastruktury (podtorza, rozjazdów, wiaduktów, mostów itp.). Rozwiązania te bazują na pomiarze odkształceń szyny kolejowej, która podlega cyklicznej elastycznej deformacji podczas przejazdu pociągu z prędkościami eksploatacyjnymi. Kolejowe wagi szynowe (R-WIM ang. *rail weigh-in-motion*) tej grupy różnią się zarówno pod względem typu, jak i miejsca instalacji czujników użytych do ich budowy. W praktyce stosowane są tensometry oporowe [3], piezoelektryczne czujniki odkształceń [4] lub czujniki światłowodowe [5]. Przetworniki mogą być instalowane do spodniej części stopy szyny [6, 7] lub montowane w środkowej części szyłki szyny w rejonie jej osi obojętnej [8]. W pierwszym przypadku czujnik mierzy deformację wzdłużną stopy szyny, wywołaną głównie efektem jej zginania. W drugim przypadku lokalizacji sygnał związany jest zasadniczo z siłami ścinającymi występującymi w szynie. Istnieją też sposoby bazujące na pomiarze odkształceń elementów konstrukcyjnych mostów kolejowych (B-WIM, ang. *bridge weigh-in-motion*) [9, 10] oraz mostów drogowych [11] podczas ruchu pojazdów.

2. Opis metody i systemu pomiarowego

Opracowane i wykonane w firmie Adaptronica systemy pomiarowe monitorujące obciążenia w transporcie kolejowym oparte są na metodzie polegającej na określeniu odkształceń szyny kolejowej wywołanych przejazdem pociągu. Sposób identyfikacji obciążenia opiera się na pomiarze przenośną wagą dynamiczną, będącą modyfikacją opisanego w pracy [12] rozwiązania, z zastosowaniem zastrzeżonego

patentem [13] przetwornika. Pozwala ona na określenie nacisków osiowych, masy każdego wagonu oraz całego składu pociągu, prędkości i kierunku ruchu pociągu, jak również liczby i rodzaju wagonów.

Ogólną koncepcję metody i systemu pomiarowego przenośnej, dynamicznej wagi kolejowej przedstawiono schematycznie na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat ogólny: a) koncepcja metody pomiaru, b) system pomiarowy

Omawiany system spełnia kilka podstawowych założeń:

- montaż systemu możliwy w warunkach normalnej eksploatacji linii kolejowej, bez konieczności zamykania jej na czas instalacji,
- nieinwazyjna instalacja czujników, brak ingerencji w elementy torowiska (podkłady, podtorze itp.),

- identyfikacja obciążeń bez konieczności nakładania ograniczeń administracyjnych na prędkość pociągów,
- możliwość powrotu do stanu pierwotnego odcinka torowiska po usunięciu systemu,
- względnie niskie koszty montażu i eksploatacji systemu.

3. Monitorowanie pojazdów szynowych przeñośną wagą dynamiczną

Przedmiotem monitorowania pojazdów szynowych były zarówno pociągi osobowe, jak i towarowe. Systemy pomiarowe zawierały przeñośne przetworniki odkształcenia mocowane do stopki szyny w sposób nieinwazyjny. Widok instalacji przetwornika do stopki szyny przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Widok przeñośnego przetwornika dynamicznej wagi kolejowej

Sposób detekcji obciążeń opiera się na pomiarze przetwornikiem zawierającym tensometry oporowe pracujące w układzie pełnego mostka Wheatstone'a.

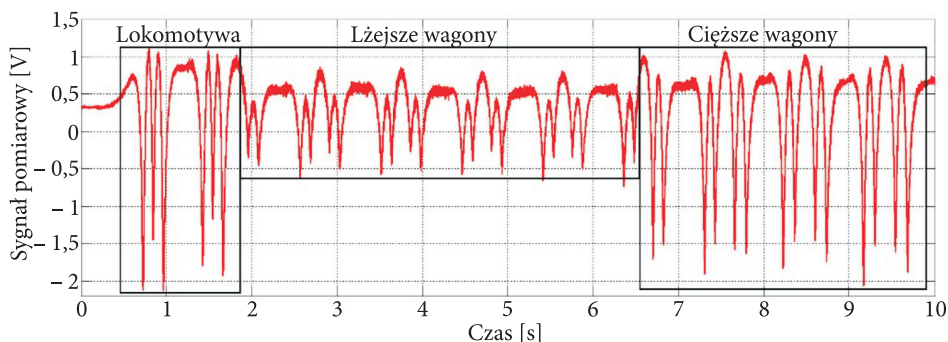
Sygnaly pomiarowe związane z przejazdami pociągów rejestrowano w pamięci wewnętrznej wagi oraz przesyłano bezprzewodowo na serwer sieci internetowej. Przykładowy przebieg sygnału zmierzonego przeñośnym przetwornikiem wagi kolejowej podczas przejazdu pociągu towarowego przedstawiono na rysunku 3.

Ważenie dynamiczne sprowadza się do akwizycji i przetwarzania amplitudy sygnałów pomiarowych odkształcenia wywołanych naciskiem kół poruszającego się pojazdu.

Zarejestrowane oddziaływanie mechaniczne zawiera dwie składowe. Pierwsza z nich, statyczna, jest stała w czasie i odpowiada sile normalnej, z jaką koła nieruchomego pojazdu oddziałują na nawierzchnię drogi lub szynę. Do tej składowej odnoszą

się zarządzenia administracyjne dotyczące pojazdów związane z dopuszczalnymi naciskami osiowymi. Ta wielkość obciążenia stanowi podstawę do określenia klasy dokładności wagi.

Druga składowa, dynamiczna, jest zmienna i występuje w czasie ruchu pojazdu. Zależy ona od takich czynników jak m.in.: prędkość ruchu, stan techniczny zawieszenia i kół pojazdu. Zmierzona składowa dynamiczna zależy również od stanu elementów nawierzchni jezdni i torowiska, stąd też wynika konieczność kalibracji systemu po zmianie lokalizacji instalacji wagi.

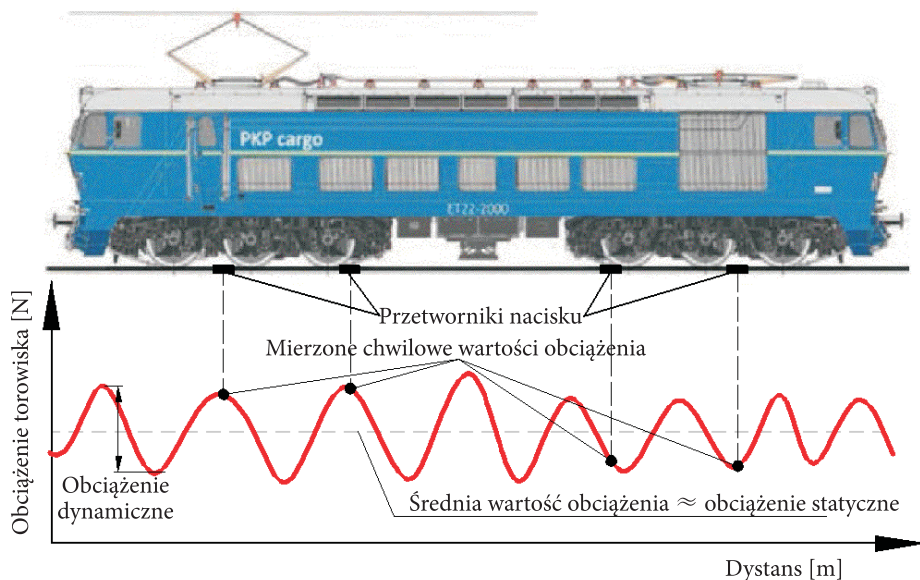


Rys. 3. Przykładowy sygnał pomiarowy zarejestrowany podczas przejazdu pociągu towarowego

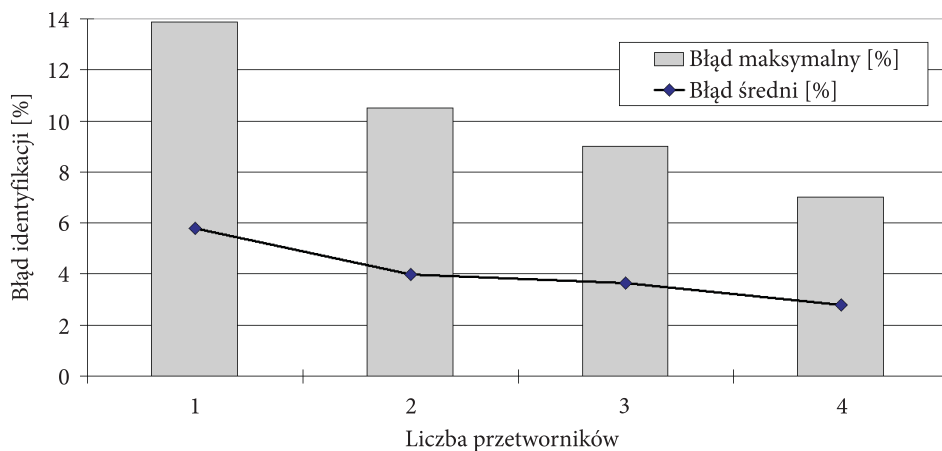
Dla zwiększenia dokładności estymacji zastosowano współczynniki kalibracji uwzględniające wpływ typu wózków wagonu na wynik pomiaru nacisków osiowych. Do celów kalibracji systemu ważenia dynamicznego zastosowano metodę opartą na porównaniu wyników ważenia dynamicznego z wstępnie zważonymi pojazdami szynowymi wagą statyczną.

Zastosowano również metodę autokalibracji, która polega na cechowaniu systemu w czasie ruchu pociągu wynikami pomiaru ważenia pojazdu odniesienia o znanej masie, za który przyjęto, będące częścią składu, elektrowozy ET-22. Tego typu metoda z pojazdami odniesienia znajduje zastosowanie również w kalibracji dynamicznych wag samochodowych [14].

Na rysunku 4 pokazano przykładowo przebieg zmiennego w czasie obciążenia wywieranego na torowisko podczas ruchu elektrowozu ET-22. Czarnymi kropkami zaznaczono chwilowe wartości obciążenia zarejestrowane wagą dynamiczną z czterema przetwornikami nacisku. Wartości z dwóch pierwszych przetworników są zawyżone, a wartości z pozostałych są zaniżone względem obciążenia statycznego, zmierzonego pierwotnie wagą statyczną. Zmienność siły kontaktowej koło-szyna jest jedną z przyczyn różnic pomiaru między wagą dynamiczną a statyczną.

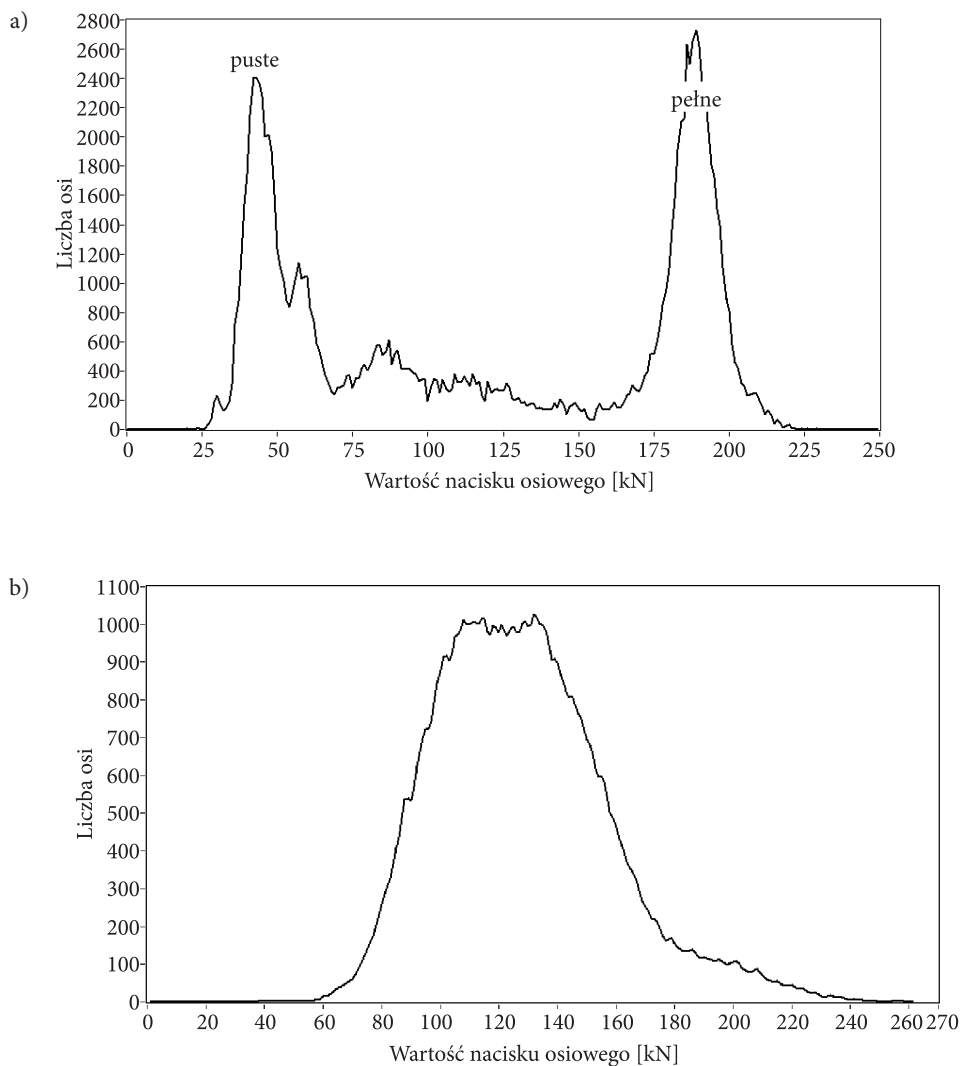


Rys. 4. Przykładowy przebieg zmiennego w czasie obciążenia torowiska podczas ruchu elektrowozu ET-22



Rys. 5. Maksymalny oraz średni błąd identyfikacji masy wagonów w zależności od liczby przetworników wagi dynamicznej

Dokonano porównania wyników pomiaru obciążeń zarejestrowanych wagą statyczną z rezultatami otrzymanymi z przenośnej dynamicznej wagi kolejowej. W badaniach zastosowano różną liczbę przetworników przenośnej wagi kolejowej do estymacji wartości obciążenia. Wyniki różnicy wagi pociągu towarowego dla obu rodzajów pomiarów (statycznego i dynamicznego) podano na rysunku 5. Określono maksymalny oraz średni błąd identyfikacji masy poszczególnych wagonów zmierzonych przenośną wagą dynamiczną przy różnej liczbie przetworników pomiarowych.



Rys. 6. Histogram częstości występowania wartości nacisków osiowych:
a) pociągi towarowe, b) pociągi osobowe

Błąd identyfikacji obciążenia przenośną wagą dynamiczną w stosunku do wyników pomiaru wagą statyczną zmniejsza się wraz ze zwiększeniem liczby przetworników wagi dynamicznej.

Zarejestrowane w połowie roku wyniki pomiarów nacisków osiowych pociągów towarowych i osobowych przenośną wagą dynamiczną poddano analizie statystycznej. Wyznaczono histogramy częstości występowania nacisków osiowych. Histogramy obejmują liczbę osi pojazdów w funkcji wartości nacisków tych osi — dla obu rodzajów pojazdów szynowych. Zaobserwowano znaczne jakościowe i ilościowe różnice między rodzajami pojazdów, które przedstawiono na rysunku 6.

W przypadku pociągów towarowych zaobserwowano dwa wyraźne maksima częstości występowania nacisków w funkcji wartości obciążenia. Pierwsze maksimum zlokalizowane jest w przedziale 30-70 kN i odpowiada wagonom bez obciążenia, natomiast drugie to 170-220 kN i odpowiada wagonom z pełnym obciążeniem. Dla pociągów osobowych widoczne jest jedno główne maksimum w zakresie 110-130 kN.

Zgromadzone dane w postaci histogramów dotyczące obciążeń torowiska pojazdami szynowymi stanowią istotną informację wspomagającą proces projektowania nowych lub modernizację dawnych obiektów infrastruktury kolejowej.

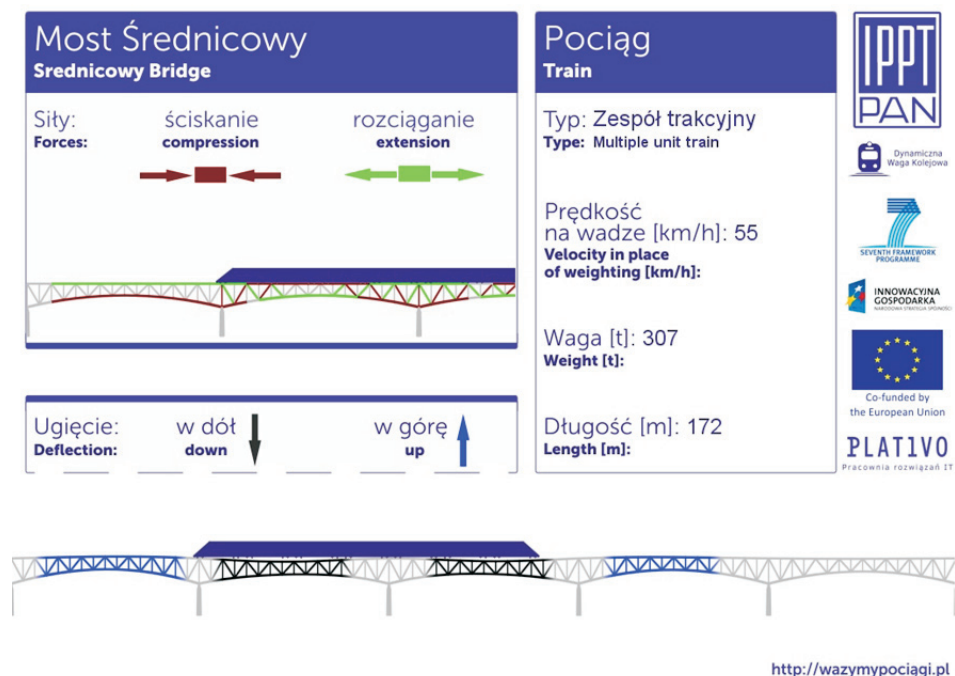
4. Zastosowanie wagi do monitorowania mostów kolejowych

Jednym z obszarów potencjalnego zastosowania przenośnej wagi kolejowej jest monitorowanie obciążeń i stanu konstrukcji mostów kolejowych. Działanie systemu ważenia pociągów w ruchu do monitorowania mostów kolejowych przedstawiono w Centrum Nauki Kopernik w Warszawie, na ekranie demonstratora „Inteligentny most”. Demonstrator został opracowany koncepcyjnie i technicznie w ramach projektu europejskiego realizowanego przez Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, we współpracy w zakresie oprogramowania z firmą Plativo oraz przy zastosowaniu dynamicznej wagi kolejowej opracowanej i wykonanej przez firmę Adaptronica.

Pociąg przed wjazdem na Most Średnicowy w Warszawie jest ważony wagą dynamiczną, a uzyskane informacje, poprzez sieć połączeń, są przekazywane do zdalnego serwera. Komputer demonstratora wyposażony jest w oprogramowanie umożliwiające określenie wielkości deformacji i sił wewnętrznych konstrukcji mostu podczas przejazdu pociągu. Dynamiczne wielkości przemieszczeń i naprężeń są uzyskiwane poprzez superpozycję stanów wywołanych przejazdem jednostkowej siły, uwzględniając zmierzone wartości nacisków osiowych przejeżdżającego składu pociągu.

Zwiedzający Centrum Nauki Kopernik mogą w czasie rzeczywistym porównać obraz przejeżdżającego przez Most Średnicowy pociągu z odpowiadającym mu obrazem symulacji komputerowej dynamiki zmian konstrukcji mostu.

Na rysunku 7 przedstawiono widok ekranu demonstratora „Inteligentny most” w Centrum Nauki Kopernik w Warszawie w czasie przejazdu zespołu trakcyjnego Szybkiej Kolei Miejskiej.

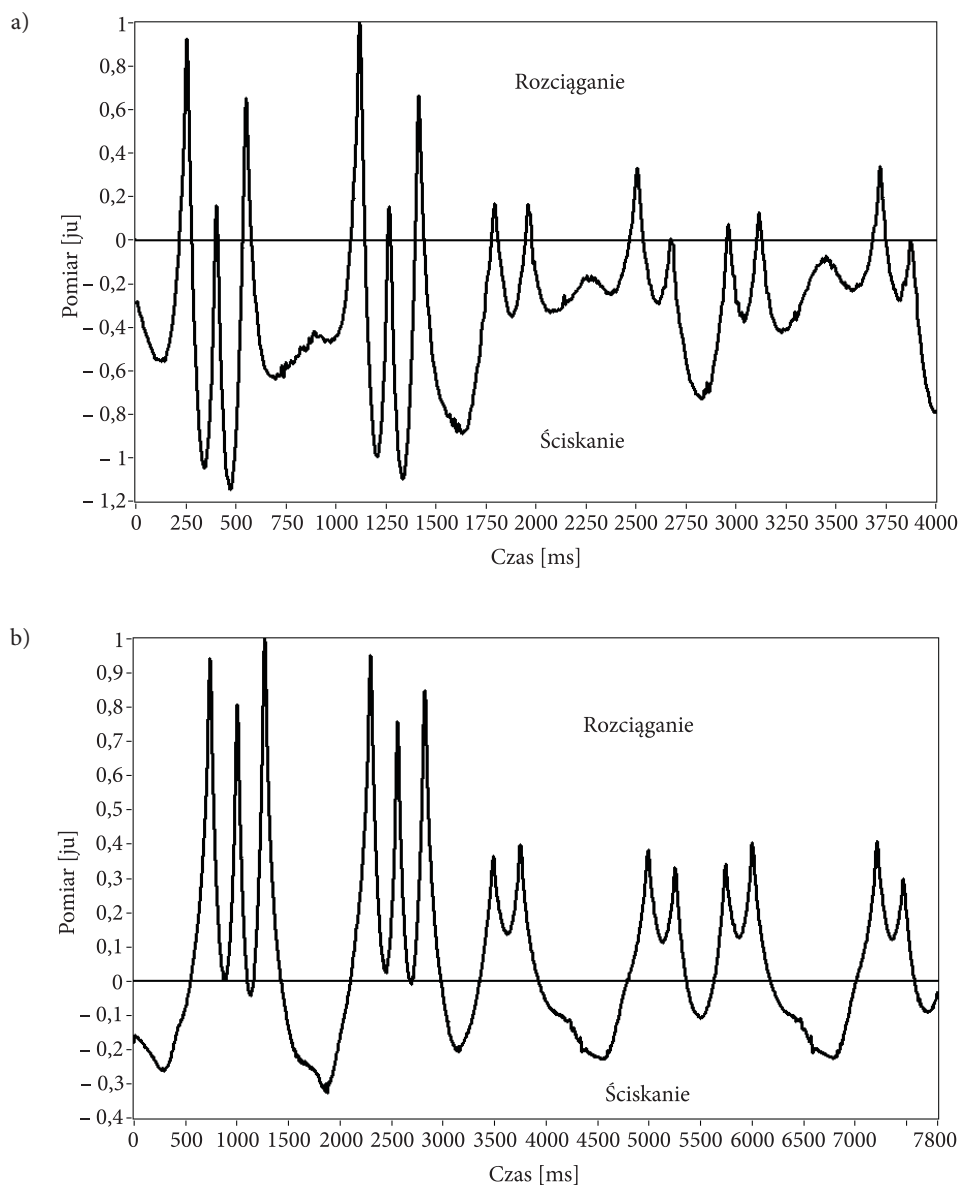


Rys. 7. Widok ekranu demonstratora „Inteligentny most” w Centrum Nauki Kopernik w Warszawie w czasie przejazdu zespołu trakcyjnego Szybkiej Kolei Miejskiej

5. Diagnostyka stanu podtorza

Stan techniczny szyny i podtorza istotnie wpływa na przebieg sygnału pomiarowego obciążenia szyny oraz późniejszą estymację wartości obciążeń. Aby ocenić wpływ stanu podtorza na wartość pomiaru obciążenia wagą dynamiczną przeprowadzono pomiary przed remontem i po remoncie okresowym podtorza. Remont polegał na zagęszczeniu struktury podtorza nasypu kolejowego przy użyciu podbijarki tłucznia. Na rysunku 8 przedstawiono przebiegi czasowe sygnałów pomiarowych odkształcenia szyny kolejowej zarejestrowane podczas przejazdów pociągów towarowych, w tej samej lokalizacji montażu przetwornika, unormowane do wartości maksymalnej odkształcenia. Przebieg sygnału pomiarowego przedstawiony na rysunku 8a uzyskano przed, natomiast przebieg podany na rysunku 8b po remoncie

podtorza. Pomiary odpowiadają obciążeniu ruchem pociągów o podobnych strukturach składu składającego się z lokomotywy o sześciu osiach ciągnącej czteroosiowe wagony towarowe.



Rys. 8. Sygnały odkształcenia szyny kolejowej zarejestrowane przenośną wagą kolejową podczas przejazdu pociągu towarowego: a) przed zagęszczeniem podtorza, b) po zagęszczeniu podtorza

Analiza jakościowa sygnałów pomiarowych odkształceń szyny kolejowej wykazuje bardzo różny charakter tych sygnałów w zależności od stanu podtorza. W przypadku podtorza przed dokonaniem remontu okresowego sygnał z przejazdu pociągu charakteryzuje się zbliżonymi wartościami dotyczącymi ściskania i rozciągania szyny. Sygnał pomiarowy uzyskany po remoncie wskazuje, że podczas przejazdu pociągu dominujące jest rozciąganie szyny. Efekt ten może stanowić przesłankę do prowadzenia dalszych badań dotyczących diagnostyki i monitorowania stanu podtorza w oparciu o wyniki pomiarów dynamiczną wagą kolejową.

6. Wnioski

Ważenie pojazdów w ruchu opisaną metodą i systemem przenośnej, dynamicznej wagi kolejowej pozwala na określenie nacisków osiowych, masy każdego wagonu oraz całego składu pociągu, prędkości i kierunku ruchu pociągu, jak również liczby i rodzaju wagonów.

Przenośna waga dynamiczna umożliwia identyfikację i ustalenie wartości przekroczeń dopuszczalnych prędkości pociągu i obciążenia torowiska, określonych odpowiednimi przepisami administracyjnymi.

Monitorowanie obciążeń w okresie użytkowania elementów infrastruktury (mosty, wiadukty, rozjazdy, podtorza itp.) dostarcza danych o rzeczywistym obciążeniu konstrukcji i jest istotną wskazówką wspomagającą ocenę stopnia zużycia i prognozę długości życia danej infrastruktury.

Określenie rozkładu statystycznego obciążeń dynamicznych torowiska, wywieranych przez przejeżdżające pociągi, stanowi istotną informację w procesie projektowania infrastruktury kolejowej (mosty, wiadukty, rozjazdy, podtorza itp.).

Charakter przebiegu czasowego sygnału pomiarowego dynamicznej wagi kolejowej może stanowić przesłankę do oceny stanu technicznego podtorza.

Źródło finansowania pracy — środki własne firmy ADAPTRONICA Sp. z o.o.

Artykuł wpłynął do redakcji 17.09.2019 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 6.02.2020 r.

Krzysztof Sekuła <https://orcid.org/0000-0002-0081-2899>

Dariusz Wiącek <https://orcid.org/0000-0002-1689-821X>

Jerzy Motylewski <https://orcid.org/0000-0003-1877-4875>

LITERATURA

- [1] WIŚNICKI B., WOLNOWSKA A., *The systems of automatic weight control of vehicles in the road and rail transport in Poland*, LogForum 7, 3, 3, 2011.
- [2] SENYANSKIY D.M., 2003, *Problem of Increasing the Accuracy of Railway Carriages Weighing in Motion*, XVII IMEKO World Congress, 2003.
- [3] DELPRETE C., ROSSO C., *An easy instrument and a methodology for the monitoring and the diagnosis of a rail*, Mechanical Systems and Signal Processing 23, 3, 2009, 940-956.
- [4] SEKUŁA K., KOŁAKOWSKI P., *Piezo-based weigh-in-motion system for the railway transport*. Structural Control and Health Monitoring, DOI: 10.1002/stc.416, 2010.
- [5] LAI C.C., KAM J.C.P., LEUNG D.C.C., LEE T.K.Y., TAM A.Y.M., HO S.L., TAM H.Y., LIU M.S.Y., *Development of a Fiber-optic Sensing System for Train Vibration and Train Weight Measurements in Hong Kong*, Journal of Sensors, vol. 2012, DOI: 10.1155/2012/365165.
- [6] HOLNICKI-SZULC J., ŚWIERCZ A., 2014, *Monitorowanie obciążeń i stanu technicznego konstrukcji mostowych* [in English: *Monitoring the Loads and Technical Conditions of Bridge Structures*], IPPT Reports on Fundamental Technological Research, 1, 2014.
- [7] MELI E., PUGI L., *Preliminary development, simulation and validation of a weigh in motion system for railway vehicles*, Meccanica, 48, 10, 2013, 2541-2565.
- [8] CORTIS D., GIUKIANELLI S., MALAVASI G., *Self-diagnosis method for checking the wayside systems for wheel-rail vertical load measurement*, Transport Problems, 12, 4, 2017, 91-100.
- [9] LILJENCRAANTZ A., *Monitoring Railway Traffic Loads Using Bridge Weight-in-motion*, Division of Structural Design and Bridges, Royal Institute of Technology, PhD thesis, Stockholm, Sweden, 2007.
- [10] ŽNIDARIČ A., KALIN J., KRESLIN M., FAVAI P., KOLAKOWSKI P., *Railway Bridge Weigh-in-motion System*, Transportation Research Procedia, 14, 2016, 4010-4019.
- [11] <https://www.cestel.eu/>
- [12] SEKUŁA K., WIĄCEK D., MOTYLEWSKI J., *In Motion Rail Scale as a component of the railway bridge diagnostic systems*, Scientific Journal of Silesian University of Technology, Series Transport, vol. 101, 2018.
- [13] *Przetwornik pomiaru odkształceń sprężystych szyny*, ADAPTRONICA sp. z o.o., ul. Szpitalna 32, 05-092 Łomianki, Zgłoszenie patentowe Nr P.418594.
- [14] BURNOS P., *Autokalibracja systemów ważących pojazdy samochodowe w ruchu oraz analiza i korekcja wpływu temperatury na wynik ważenia*, rozprawa doktorska, AGH, Kraków 2009.

K. SEKUŁA, D. WIĄCEK, J. MOTYLEWSKI

Monitoring of railway vehicles and infrastructure by portable dynamic scale

Abstract: The article presents the devices for monitoring loads in railway transport, developed and manufactured by the Adaptronica company. Dynamic scales utilize portable transducers fixed in a non-invasive way to the rail foot. Load identification is based on the measurements of rail deformations caused by a passing train. The article presents the results obtained during the monitoring of railway lines, characterized by significant intensity of train traffic. Histograms of axial load values of the tested vehicles were determined. The measurements' results were verified with the results obtained with a reference static scale or with the results obtained during passage of locomotives with a given mass.

Keywords: portable dynamic rail scale, weight in motion, railway infrastructure monitoring

DOI: 10.5604/01.3001.0013.9733