

SYSTEM MONITOROWANIA OBCIĄŻEŃ ORAZ STANU TECHNICZNEGO KRATOWNICOWYCH MOSTÓW W KOLEJNICTWIE

Krzysztof Sekuła¹⁾, Przemysław Kołakowski²⁾, Andrzej Świercz¹⁾

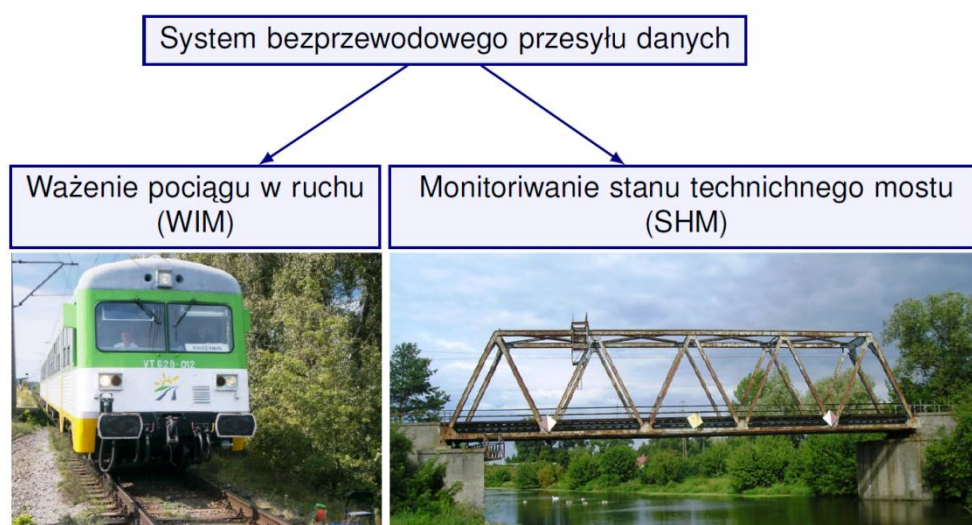
¹⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

²⁾ Adaptronica sp. z o.o.

1. Wstęp

Liczna, starzejąca się infrastruktura kolejowa wymaga okresowych, specjalistycznych inspekcji w celu oceny jej stanu technicznego. Taki stan rzeczy wywołuje naturalną potrzebę dysponowania wiarygodnym i łatwym w użyciu narzędziem diagnostycznym dostarczającym informacji odpowiednim służbom o stanie technicznym danego obiektu. Te z kolei decydują o rozpoczęciu prac remontowych lub odłożeniu ich w czasie, czy też zamknięciu obiektu. Istotnym czynnikiem wpływającym na żywotność eksploatowanych obiektów jest ich właściwe użytkowanie, a w szczególności – w przypadku torów kolejowych – przestrzeganie przez przewoźników ograniczeń związanych z obciążeniami osiowymi i liniowymi.

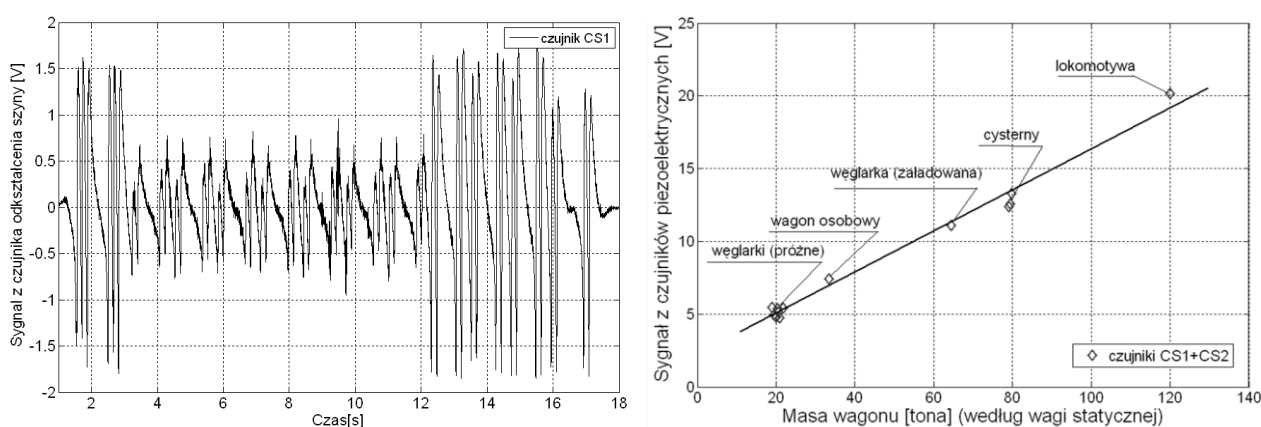
Przedstawiony w pracy rozwijany system monitorowania obciążeń i stanu technicznego kratownicowych mostów jest odpowiedzią na nakreślony powyżej problem. Instalacja tego systemu nie wymaga nakładania istotnych ograniczeń na rozkład ruchu taboru kolejowego. Koncepcja zarówno identyfikacji obciążenia (weigh-in-motion, WIM) jak i monitorowania mostów jest oparta na analizie sygnałów pochodzących z czujników piezoelektrycznych umieszczonych odpowiednio na szynach (przed wjazdem na most) oraz na elementach obiektu mostowego. Zaletą tego systemu w porównaniu do innych rozwiązań konkurencyjnych [1], [2] są niższe koszty związane z instalacją oraz bezprzewodowa transmisja do centrum obliczeniowego. W celu opracowania tego systemu spółka PKP PLK udostępniła jednotorowy, kratownicowy most kolejowy położony w Nieporęcie.



Rys. 1. System bezprzewodowego przesyłu danych obsługujący ważenie w ruchu i monitorowanie stanu technicznego mostu.

2. System ważenia w ruchu

Identyfikacja obciążenia jest realizowana pośrednio, przy wykorzystaniu pomiaru drgań szyny kolejowej wywołanych przejazdem pociągu. Drgania szyny (odkształcenia wzdłużne) są mierzone przez czujniki piezoelektryczne umieszczone na stopce szyny w środku rozpiętości pomiędzy podkładami. Sygnał pomiarowy jest poddawany kondycjonowaniu (wzmocnieniu, filtrowaniu) i bezprzewodowo przesyłany do centrum obliczeniowego, której głównym celem jest identyfikacja obciążenia. Opracowywany układ bezprzewodowego przesyłu danych będzie wykorzystywany zarówno do transmisji sygnałów z systemu ważenia w ruchu jak i systemu identyfikacji defektów w kratownicowych mostach (por rys. 1). Źródło zasilania tego układu stanowią baterie z możliwością ich doładowywania przy użyciu ogniw fotowoltaicznych. W czasie wolnym od pomiarów system jest przełączony w tryb czuwania, co jest istotne ze względu na racjonalne wykorzystanie energii elektrycznej. Dwa czujniki aktywacyjne znajdujące się przed i za urządzeniem są odpowiedzialne za przełączenie systemu w tryb aktywny z chwilą przejazdu pociągu. Szerszy opis tego systemu można znaleźć w pracy [3].



Rys. 2. a) sygnał zarejestrowany przez czujniki podczas przejazdu pociągu towarowego, b) poziom sygnału z czujników w zależności od masy wagonu.

Podstawą do identyfikacji obciążeń jest analiza amplitud sygnałów zarejestrowanych przez czujniki dla kolejnych osi składu. Na rys. 2a) przedstawiono przykładowy sygnał wywołany przez pociąg towarowy. Początkowa część sygnału (0s-3s) koresponduje z obciążeniem wywołanym lokomotywą o dwóch trzyosiowych wózkach, a kolejna (3s-18s) odpowiada wagonom o wózkach dwuosiowych. Pierwszych siedem wagonów (3s-12s) było lżejszych, a cztery kolejne (12s-18s) wyraźnie cięższe. Proponowane rozwiązanie wymaga jednak wstępnej kalibracji. Można ją przeprowadzić wykorzystując do tego celu pociąg o znanych parametrach. W opisywanym przypadku użyto statyczną wagę kolejową, na której zważono poszczególne wagony składu. Przeprowadzone pomiary pokazują, że relacja między amplitudami sygnałów a masą statyczną ma charakter liniowy – zależności te przedstawiono na rys. 2b). Ciężar wagonu jest odniesiony do sumy amplitud sygnałów dla wszystkich osi tego wagonu zmierzonych dwoma sensorami zlokalizowanymi na przeciwległych szynach. Zdecydowana większość używanych lokomotyw w Polsce to typ ET-22 o masie ok. 120 ton. Informację tą można wykorzystać do dynamicznej kalibracji układu pomiarowego.

3. Identyfikacja uszkodzeń

Różnica drgań konstrukcji mostu o projektowych własnościach i mostu eksploatowanego wywołanych tym samym przejeżdżającym pociągiem są podstawą do przeprowadzenia analizy odwrotnej. Polega ona na określeniu lokalizacji i intensywności zmian parametrów wywołanych eksploatacją tego obiektu lub działaniem czynników środowiskowych. Istotna jest tu znajomość obciążenia, które może być zmierzone z wykorzystaniem powyżej opisanej wagi kolejowej,

położonej w pobliżu rozważanego mostu.

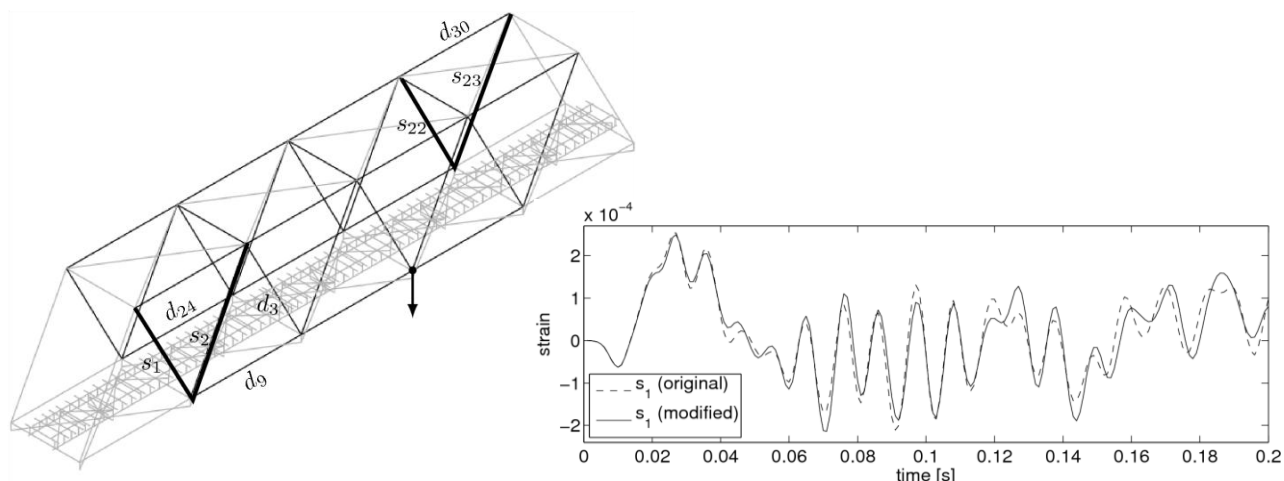
Modelowanie zmian parametrów elementów konstrukcji za pomocą metody dystorsji wirtualnych (MDW) przedstawiono dla zadań statyki, dynamiki w pracy [3] i drgań ustalonych pracy [4]. MDW efektywnie wykorzystuje zasadę superpozycji konstrukcji początkowej (nieuszkodzonej) oraz konstrukcji sprężonej, w której wprowadzono wstępne deformacje (tzw. dystorsje wirtualne). Odpowiedź konstrukcji sprężonej jest efektywnie obliczana dzięki tzw. macierzy wpływu, zawierającej odpowiedzi konstrukcji wyrażone w odkształceniach na lokalnie wprowadzoną deformację (dystorsję wirtualną). Odpowiedź konstrukcji modelowanej dystorsjami wirtualnymi jest więc sumą odpowiedzi konstrukcji początkowej i sprężonej.

Identyfikację uszkodzeń można przedstawić jako zadanie gradientowej optymalizacji z odpowiednio zdefiniowaną funkcją celu:

$$F(\mu) = \sum \frac{(\varepsilon - \varepsilon^M)^2}{(\varepsilon^M)^2},$$

gdzie ε i ε^M są odpowiednio odkształceniami modelowanymi dystorsjami wirtualnymi oraz odkształceniami pomierzonymi. Współrzędne wektora modyfikacji sztywności μ zdefiniowano jako iloraz zmodyfikowanego i początkowego modułu Younga.

Poniżej przedstawiono przykład identyfikacji uszkodzeń, w którym odpowiedzi konstrukcji początkowej i zmodyfikowanej wygenerowano numerycznie. Ze względu na dość złożoną konstrukcję mostu model numeryczny został stworzony przy użyciu komercyjnego oprogramowania ADINA. Na podstawie tego modelu obliczono również macierz wpływu. Przyjęto 4 sensory odkształceń oraz obciążenie impulsowe (zilustrowano na rys. 3a)). Odpowiedzi konstrukcji pierwotnej i zmodyfikowanej dla wybranego czujnika przedstawiono na rys. 3b).

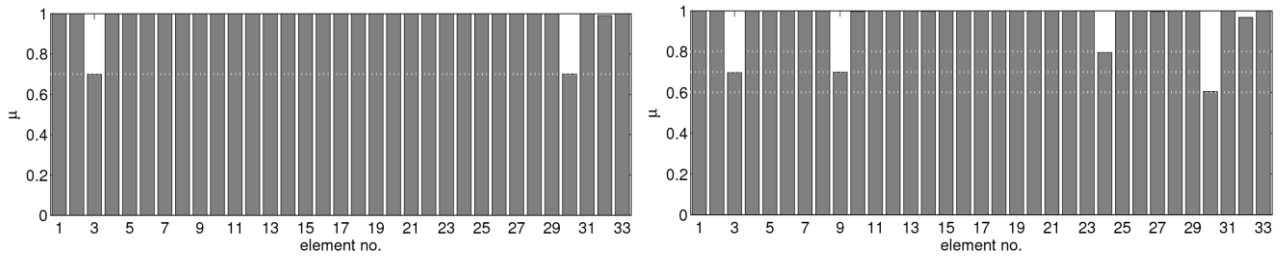


Rys. 3. a) schemat mostu, s_i – lokalizacje sensorów, d_i – lokalizacje elementów zmodyfikowanych, b) obliczone odpowiedzi na sensorze s_1 (odkształcenia) dla konstrukcji pierwotnej i zmodyfikowanej wymuszonej impulsowo.

Iteracyjny proces optymalizacji przeprowadzono metodą największego spadku (SD) oraz metodą Levenberga-Marquardta (LM). Liczbę elementów, w których identyfikowana jest modyfikacja sztywności ograniczono do 33 (por. rys. 3a) – tj. w elementach wyróżnionych kolorem czarnym). Na rys. 4a) i rys. 4b) zilustrowano rezultat przeprowadzonej optymalizacji dla dwóch scenariuszy uszkodzeń:

- Scenariusz I: redukcja modułu Younga do 70% wartości początkowej w elementach d_3 i d_{30} ;
- Scenariusz II: redukcja modułu Younga: elementy d_3 i d_9 – do 70% oraz d_{24} – 80% oraz d_{30} – do 60% wartości początkowej.

Spadek funkcji celu w obu przykładach był podobny i wynosił ok. 5 rzędów wielkości, przy czym liczba iteracji była różna. Optymalizacja z zastosowaniem metody największego spadku wymagała 1000 iteracji, podczas gdy metodą Levenberga-Marquardta liczba iteracji wynosiła 100, a tym samym czas obliczeń był istotnie krótszy.



Rys. 4. Wyniki analiz odwrotnych scenariuszy uszkodzeń: a) scenariusz I, b) scenariusz II.

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono ogólną koncepcję systemu identyfikacji obciążeń dynamicznych oraz numeryczną symulację identyfikacji degradacji sztywności w elementach kratowych konstrukcji mostu. Identyfikacja obciążenia jest przeprowadzana na podstawie analizy sygnałów z czujników piezoelektrycznych umieszczonych na szynie. Z kolei znajomość obciążenia mostu jest elementem koniecznym do przeprowadzenia analizy odwrotnej polegającej na określeniu bieżących parametrów konstrukcji.

Prace mają na celu stworzenie zintegrowanego systemu monitorowania stanu technicznego konstrukcji i wykrywania przeciążonych składów kolejowych. System ten posłuży nie tylko do celów kontrolnych, lecz także prewencji wobec przewoźników korzystających z infrastruktury kolejowej. Rezultaty pomierzonych wartości obciążeń oraz ewentualne stany ostrzegawcze i alarmowe dla konstrukcji mostowych będą dostępne przez internet dla upoważnionego personelu.

Literatura

- [1] R. Karoumi, J. Wiberg, A. Liljencrantz, Monitoring traffic loads and dynamic effects using an instrumented railway bridge, *Engineering Structures*, 27:1813–1819, 2005.
- [2] Gotcha – wheel flat detection and axle load measurement system. Technical report, TagMaster, 2005.
- [3] D. Sala, J. Motylewski and P. Kołakowski, Wireless Transmission System for a Railway Bridge subject to Structural Health Monitoring. *Diagnostyka*, 50(2):69–72, 2009.
- [4] P. Kołakowski, T.G. Zieliński, J. Holnicki-Szulc, Damage Identification by the Dynamic Virtual Distortion Method, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 15(6):479–493, 2004.
- [5] A. Świercz, P. Kołakowski and J. Holnicki-Szulc, Damage Identification in Skeletal Structures Using the Virtual Distortion Method in Frequency Domain, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22:1826–1839, 2008.