

Wykorzystanie wyników badań dynamicznych w ocenie stanu technicznego mostu kolejowego

Using the results of dynamic tests in assessing the technical condition of a railway bridge

dr inż. Stefan Pradelok (ORCID: 0000-0003-1902-1269), dr inż. Grzegorz Poprawa (ORCID: 0000-0001-7863-1011), Katedra Mechaniki i Mostów, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska

DOI: 10.5604/01.3001.0053.9354

Streszczenie: W artykule opisano zastosowanie badań dynamicznych pod ruchem w ocenie stanu technicznego kolejowego mostu na Nysie Łużyckiej. Do identyfikacji parametrów dynamicznych zastosowano operacyjną analizę modalną. Uzyskane wyniki posłużyły do weryfikacji modelu numerycznego wykorzystanego w procesie oceny stanu technicznego i określenia aktualnej nośności konstrukcji. Przeprowadzony eksperyment pozwolił na zaobserwowane odpowiedzi dynamicznej specyficznej dla mostów typu półrama. W pracy pokazano, że badania dynamiczne pod ruchem i z wykorzystaniem innych dostępnych wzbudzeń środowiskowych mogą stanowić uzupełnienie innych nieniszczących metod diagnostycznych.

Słowa kluczowe: operacyjna analiza modalna, most kolejowy, półrama, kratownica.

Abstract: The paper describes dynamic tests conducted during normal operation of the railway bridge on the Nysa Łużycka River. The Operational Modal Analysis was used to identify the dynamic parameters of the bridge. The obtained results were used to verify the numerical model used in the process of assessing the technical condition of the bridge and to determine the current load-bearing capacity of the structure. Specific dynamic behavior of a pony truss was observed. Dynamic testing under ambient vibrations and real traffic can supplement other non-destructive diagnostic methods.

Keywords: operational modal analysis, railway bridge, pony truss.

1. Wprowadzenie

PKP Polskie Linie Kolejowe eksploatuje ok. 25,6 tys. obiektów inżynierskich, w tym ponad 3,3 tys. mostów i wiaduktów. Łączna długość eksploatowanych mostów i wiaduktów wynosi ok. 133 km. Wiek około 45% z nich przekracza 100 lat, a fragmenty najstarszych, nadal eksploatowanych, konstrukcji mostowych pochodzą z 1840 roku [1, 2]. Obecnie jest realizowany w Polsce program rewitalizacji linii kolejowych. Starzejąca się infrastruktura kolejowa stanowi poważny problem dla bezpieczeństwa ruchu. Dotyczy to szczególnie obiektów mostowych, zwłaszcza tych położonych poza głównymi korytarzami komunikacyjnymi. Konstrukcje względem których występuje obawa, że ich stan techniczny może mieć wpływ na bezpieczeństwo ruchu, poddawane są

szczególnym inspekcjom i różnego rodzaju badaniom. Celem tych badań jest ocena możliwości dalszej eksploatacji konstrukcji bądź konieczności jej wymiany.

Artykuł opisuje zastosowanie badań dynamicznych pod ruchem w procesie oceny stanu technicznego stalowego mostu kolejowego typu półrama (rys. 1). Identyfikację parametrów modalnych przeprowadzono z zastosowaniem operacyjnej analizy modalnej (ang. *Operational Modal Analysis* – OMA). W pracy przedstawiono wyniki identyfikacji, zwracając uwagę na specyficzną odpowiedź dynamiczną konstrukcji typu półrama. Zastosowane rozmieszczenie przetworników drgań pozwoliło na jednoznaczną identyfikację kilku istotnych postaci drgań. Wyniki wykorzystano do weryfikacji modelu obliczeniowego i dalszych analiz numerycznych.

Rys. 1. Most będący przedmiotem opisanych badań



2. Badania dynamiczne pod ruchem

2.1. Typowe badania dynamiczne

Jedną z metod oceny stanu technicznego konstrukcji są badania pod próbnym obciążeniem [3, 4]. Badania tego typu wymagają zamknięcia ruchu na moście. Na próbne obciążenia składają się dwa rodzaje prób, statyczne i dynamiczne [5]. W próbie statycznej sprawdzane są efekty obciążenia statycznego, czyli najczęściej osiadania i przemieszczenia powstające od tych obciążeń. Próby dynamiczne polegają zazwyczaj na wykonaniu szeregu przejazdów z różnymi prędkościami arbitralnie wybranego pojazdu szynowego lub całego składu. Obserwacji podlegają efekty dynamiczne, przemieszczenia i przyspieszenia, wywołane przejazdami taboru próbnego. Analiza wyników próby dynamicznej ogranicza się do prostej analizy sygnałów [6]. Takie podejście może sprawdzić się w przypadku prostych mostów o dobrze oddzielonych postaciach drgań własnych. Jednak wiąże się to z dwoma głównymi ograniczeniami. Kluczowym ograniczeniem jest konieczność zamykania ruchu na badanym obiekcie oraz na przylegającym odcinku linii kolejowej, co umożliwia uzyskanie wymaganej prędkości przejazdu przez tabor próbny. Innym, nie mniej istotnym ograniczeniem, są koszty wynajęcia i ubezpieczenia pojazdu próbnego.

2.2. Badania pod ruchem z zastosowaniem Operacyjnej Analizy Modalnej (OMA)

Alternatywą do typowych próbnych obciążeń dynamicznych są badania pod normalnym ruchem wykorzystujące wszelkie dostępne, losowe, nieskorelowane wymuszenia czyli operacyjna analiza modalna [7–10]. Opisany w artykule eksperyment został przeprowadzony z zastosowaniem właśnie analizy OMA. Innym polskim określeniem tej technologii jest eksploatacyjna analiza modalna.

W badaniach z zastosowaniem technologii OMA na potrzeby identyfikacji wykorzystuje się drgania wywołane normalną eksploatacją oraz drgania wzbudzone innymi, nieznanymi siłami wymuszającymi, takimi jak np. wiatr czy ruch pod przęsłem mostu. Badania pod normalnym ruchem pozwalają na obserwację dynamicznego zachowania konstrukcji w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Identyfikacji podlega cały system dynamiczny, czyli przęsło i jego rzeczywiste, a nie wyidealizowane warunki podparcia.

W badaniach pod normalnym ruchem znaczenia nabiera wpływ obecności pojazdów na moście na estymowane parametry modalne. W opisywanym przykładzie masa lokomotywy jest blisko dwukrotnie większa od masy przęsła. Skutkuje to tym, że sygnały zarejestrowane w momencie, gdy lokomotywa jest na pomoście nie mogą zostać wykorzystane do estymacji parametrów modalnych konstrukcji. Jednak sygnały zarejestrowane po zjeździe obciążenia zawierają już użyteczne informacje, a drgania wzbudzone przejazdem mają amplitudy wyższe od drgań typowo wzbudzanych przez inne wymuszenia.

Dobrze znany jest fakt występowania istotnego wpływu warunków środowiska na estymowane parametry modalne. Zmiana temperatury otoczenia i innych parametrów środowiskowych mogą wywoływać zmianę obserwowanej odpowiedzi dynamicznej [11].

Identyfikacja parametrów modalnych (na które składają się najczęściej trzy wielkości, częstotliwość, postać drgań własnych oraz odpowiadające tłumienie) to w OMA proces korelacji charakterystyk dynamicznych modelu matematycznego z fizycznymi właściwościami systemu otrzymanymi z danych pomiarowych. W OMA dane pomiarowe uzyskane z odpowiedzi dynamicznej pod normalną eksploatacją, wykorzystywane są do estymacji parametrów modelu, który opisuje obserwowane zachowanie konstrukcji. W przedstawionym w artykule doświadczeniu, do identyfikacji parametrów modalnych zastosowano algorytm Stochastic Subspace Identification bazujący na funkcjach korelacji (SSI-COR) opisany w pracy [12].

3. Kolejowy most graniczny na Nysie Łużyckiej

3.1. Opis konstrukcji

Konstrukcję nośną mostu, pod czynnym torem, stanowi sześć jednotorowych przęseł kratowych z jazdą dołem o rozpiętości teoretycznej równej 30,0 m. Most przez Nysę Łużycką zalicza się do popularnego w XX wieku typu konstrukcji mostowych stosowanego do przekraczania przeszkód o średniej rozpiętości – kratowych ustrojów półramowych. Specyfika tego rodzaju konstrukcji polega na tym, że pasy górne dźwigarów kratowych nie są poprzecznie stężone (rys. 1). Analiza obliczeniowa tego typu konstrukcji zazwyczaj wykazuje, że o nośności ustroju decyduje wyboczenie ściskającego pasa górnego dźwigara kratowego.

Do badań wybrano przęsło szóste, które znajduje się już na obszarze Niemiec. Wybór przęsła podyktowany był jego dostępnością oraz tym, że w trakcie przeglądu konstrukcji nie zaobserwowano istotnych różnic pomiędzy kolejnymi przęsłami i podporami mostu.

Most wybudowano w skosie względem przeszkody, dlatego dźwigary kratowe są przesunięte względem siebie o jedno pole długości 3,0 m. Przesunięcie to ma wpływ na kształt obserwowanych form drgań opisanych w dalszej części artykułu.

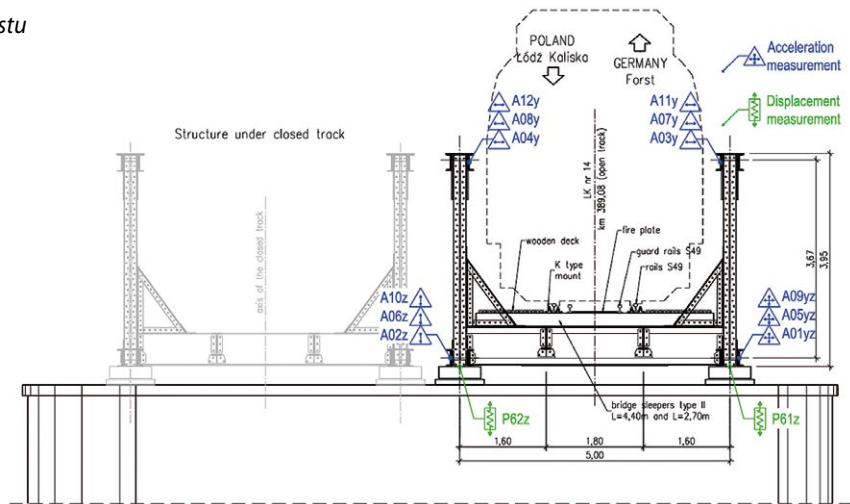
3.2. Model MES konstrukcji

Przygotowano dwa modele konstrukcji, wstępny model na potrzeby planowania i realizacji eksperymentu w programie Autodesk Robot Structural Analysis (ARSA) oraz model uwzględniający wyniki badań w programie Midas Civil. Na potrzeby tej pracy przywołano jedynie wyniki ze wstępnego modelu.

Konstrukcję szóstego przęsła wymodelowano z zastosowaniem prętowych elementów skończonych. Mosty stalowe o połączeniach nitowanych charakteryzuje wysoka

Rys. 2. Przekrój poprzeczny szóstego przęsła mostu z oznaczonymi punktami pomiarowymi

niepewność oszacowania sztywności połączeń. Jednocześnie połączenia nitowane są źródłem nieliniowości co znajduje odzwierciedlenie w estymowanych parametrach modalnych [13]. Przytoczony model uwzględniał przegubowe połączenie podłużnicy podtrzymującej tor z poprzecznicami wynikające z trudnej do oszacowania podatności połączenia tych dwóch elementów.



3.3. Program badań i przebieg eksperymentu

Rozmieszczenie punktów pomiarowych w przekroju poprzecznym pokazano na rysunku 2. Dwa czujniki indukcyjne przemieszczeń liniowych umieszczono w środku rozpiętości przęsła (P61 i P62). Z kolei akcelerometry rozmieszczono w trzech przekrojach na długości przęsła. W trakcie realizacji eksperymentu obserwacji poddano również przęsło piąte, jednak tutaj zakres pomiarów był mniejszy. Pomiar obejmował tylko przemieszczenia pionowe w środku rozpiętości (P51 i P52) oraz przyspieszenia pionowe w czterech punktach pomostu. Obserwacja przęsła piątego służyła obserwacji możliwych różnic w odpowiedzi dynamicznej sąsiednich przęseł. Widok z boku i z góry na schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych pokazano na rysunku 3. W badaniach nie objęto obserwacjami podpór ani punktów konstrukcji, w bezpośrednim sąsiedztwie punktów podparcia. Eksperyment identyfikacyjny zrealizowano w ciągu jednego dnia w stabilnych warunkach pogodowych, przy słabym wietrze i baku opadów. Położenie konstrukcji z dala od skutecznych, środowiskowych, źródeł sił wymuszających i stosunkowo niewielki rozmiar konstrukcji przełożyły się na trudności z identyfikacją słabiej wzbudzanych, wyższych form drgań własnych. Ograniczona liczba dostępnych akcelerometrów wymusiła realizację pomiarów na badanym przęśle w dwóch ustawieniach: w pierwszym ustawieniu czujniki umieszczono w punktach pomiarowych A01:A08 (rys. 3); w drugim ustawieniu czujniki umieszczono w punktach

pomiarowych A01:A04 oraz A09:A12. W trakcie pomiarów zarejestrowano łącznie prawie 5 h sygnałów. Zastosowanie wspomnianych dwóch ustawień akcelerometrów umożliwiło obserwację drgań piętnastu stopni swobody przęsła szóstego. Miało to również wpływ na możliwość obserwacji form drgań wyższego rzędu. Należy również pamiętać, że każda zmiana lokalizacji czujników wiąże się z wysoką czasochłonnością tej czynności oraz wymusza przerwę w rejestracji sygnałów pomiarowych. Ponadto opisywane badania musiały zostać wykonane w ciągu jednego dnia, a zamawiający oczekiwał tylko podstawowych informacji o zachowaniu się konstrukcji obciążonej rzeczywistymi pociągami. Badania prowadzono w uzgodnieniu z operatorem linii. Pozwoliło to na dostęp do parametrów przejeżdżającego taboru i szacunkowej godziny ich przejazdu. Model numeryczny umożliwia uzyskanie wielu postaci drgań. Ich ilość odpowiada całkowitej liczbie stopni swobody, którą mają wszystkie węzły w modelu numerycznym. Ze względu na ograniczenia techniczne, czasowe i organizacyjne w badanym obiekcie rejestrowano drgania tylko w kilku punktach konstrukcji na wybranych kierunkach. Skutkuje to ograniczeniem obserwowalności do kilku z góry wybranych postaci drgań. Oznacza to również, że niewłaściwe rozmieszczenie czujników może uniemożliwić wykrycie istotnych postaci drgań w badanej konstrukcji.

Rys. 3. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na przęśle piątym (po lewej) i szóstym (po prawej)

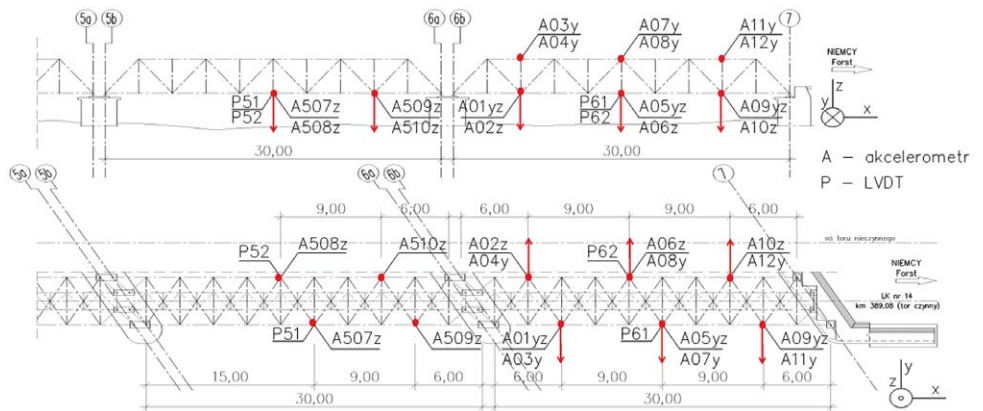


Tabela 1. Postacie drgań z modelu MES i zidentyfikowane w eksperymencie OMA

FEM		n _{OMA} /n _t	OMA				Times identified	Mode shape description
No.	n _t [Hz]		n _{OMA} [Hz]	U _{nOMA} [Hz]	ξ [%]	U _ξ [%]		
1	5.70	0.81	4.60	0.02	0.66	0.28	9	I lateral bending
2	7.29	0.96	7.83	0.14	1.24	1.33	9	I vertical bending
3	10.50	0.96	10.14	0.11	0.38	0.13	8	I torsional along x axis
4	10.94	0.91	10.06	"	0.46	"	1	II upper flange in phase
5	11.43	0.96	10.95	0.10	0.29	0.09	9	I upper flange out of phase
6	11.76	1.03	12.11	0.03	0.28	0.16	9	II upper flange out of phase
7	12.44	1.08	13.40	"	0.41	"	2	III upper flange out of phase
8	12.78	1.07	13.68	"	1.38	"	1	III upper flange in phase
16	15.48	"	"	"	"	"	0	IV upper flange in phase
17	15.51	"	"	"	"	"	0	IV upper flange out of phase
19	17.98	0.93	17.06	0.12	0.79	0.46	9	I torsional
20	20.69	"	"	"	"	"	0	II lateral bending
21	21.82	"	"	"	"	"	0	V upper flange in phase
22	21.88	"	"	"	"	"	0	V upper flange out of phase
23	22.47	0.84	21.27	"	0.34	"	3	II lateral bending
24	29.52	"	"	"	"	"	0	III lateral bending
25	28.22	"	"	"	"	"	0	II torsional

3.4. Wyniki badań

Zastosowany rozkład przetworników drgań pozwolił na jednoznaczny identyfikację kilku podstawowych form drgań własnych. Wyniki identyfikacji zestawiono w tabeli 1. Mody związane z drganiami lokalnymi nie zostały pokazane w tym zestawieniu. Zidentyfikowaną częstotliwość drgań własnych danej postaci n_{OMA} wyznaczono jako średnią arytmetyczną z kilku estymacji bazujących na różnych dostępnych sygnałach. Podobnie postąpiono z ułamkiem tłumienia krytycznego ξ. Określono również niepewność rozszerzoną eksperymentalną U_{nOMA} i U_ξ obu tych wielkości jako równą podwójnemu odchyleniu standardowemu estymat wykorzystanych do wyznaczenia wartości średniej. Niektóre mody nie zostały wykryte we wszystkich dziewięciu estymacjach. Wskazuje to na słabe wzbudzenie tych form drgań oraz może sygnalizować brak pewności estymacji. W większości przypadków niepewność estymacji tłumienia jest zdecydowanie wyższa niż niepewność estymacji częstotliwości drgań własnych.

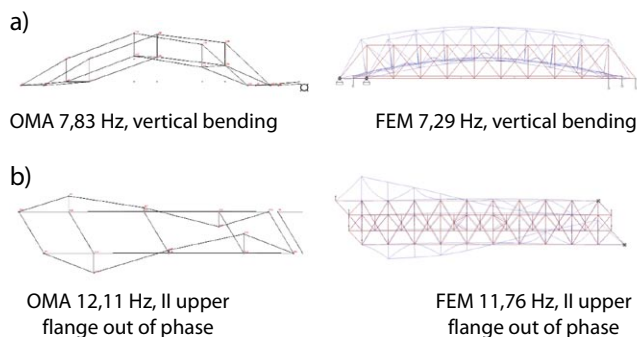
Dwa przykłady poprawnie wykrytej postaci drgań przedstawiono na rysunku 4. Jedną podstawową i jedną wyższego rzędu związaną z pasem górnym dźwigara kratowego. Wizualizację kształtu postaci przygotowano na podstawie pojedynczego ustawienia akcelerometrów. Wynika to z faktu, że stosunek sygnału do szumu w większości zarejestrowanych sygnałów był niski. Złożenie sygnałów nie dawało zadowalających efektów.

Przemieszczenia wywołane przejazdem pojedynczej, ciężkiej lokomotywy pokazano na rysunku 5. Sygnały zostały wstępnie odfiltrowane cyfrowym filtrem dolnoprzepustowym o częstotliwości odcięcia 32 Hz. Dobrze widoczne są porównywalne przemieszczenia dwóch obserwowanych przęseł. Przemieszczenia pionowe z początku przejazdu pociągu towarowego ciągniętego przez tą samą ciężką lokomotywę co na wcześniejszym wykresie pokazano na rysunku 6. Tym razem przemieszczenia maksymalne pod lokomotywą są różne w dwóch przęsłach. Podobnie wagony wywołują przemieszczenia

o różnych amplitudach. Nie znaleziono wyjaśnienia dla obserwowanych różnic. Dodatkowo, bardziej gładkie przebiegi czasowe, uzyskano po zastosowaniu filtra 0,5 Hz. Wykorzystano je do oszacowania współczynnika przewyższenia dynamicznego (WPD) jako stosunku sygnału odfiltrowanego filtrem o częstotliwości odcięcia 32 Hz do odfiltrowanego filtrem o częstotliwości odcięcia 0,5 Hz. W żadnym z zarejestrowanych przejazdów wyznaczony w ten sposób WPD nie przekroczył wartości 1,04.

Zaprezentowane wyniki (tab. 1) wskazują na trudności z jednoznaczny identyfikacją postaci drgań związanych z poprzecznym ruchem pasów górnych kratownic. Wynika to z niedostatecznej liczby punktów pomiarowych na pasie górnym. Można również zauważyć, że w przypadku niewielkich, słabo wzbudzonych konstrukcji nie wszystkie spodziewane postacie ujawniają się w stopniu pozwalającym na ich wykrycie. Przedstawione wyniki dotyczą krótkotrwałej kampanii pomiarowej. Długotrwałe pomiary za pomocą systemu monitoringu drgań mogły by dać więcej informacji dotyczących zmienności odpowiedzi dynamicznej konstrukcji wraz ze zmianą warunków środowiskowych. Warunki pogodowe w dniu badania zostały odnotowane i stanowią element raportu z badań. Powinno to pozwolić odnieść informacje pozyskane w rezultacie opisanego eksperymentu do przyszłych wyników uzyskanych w podobnych warunkach. Istotne różnice mogą być przesłanką wskazującą na zmianę w konstrukcji.

Zakres eksperymentu ograniczono do obserwacji jednego z sześciu przęseł. Może to w istotny sposób podważać zasadność przeniesienia wniosków z badań pojedynczego przęsła na pozostałe konstrukcje tego samego typu, pomimo przeprowadzenia inspekcji wszystkich przęseł i niewykrycia



Rys. 4. Porównanie kształtów postaci drgań własnych z eksperymentu OMA i modelu MES; a) kształtu postaci niskiego rzędu; b) kształtu postaci wysokiego rzędu

istotnych różnic. Potencjalna zmienność wyników eksperymentów identyfikacyjnych OMA poszczególnych przęseł mogła by być wskaźnikiem istotnych, niewykrytych w trakcie przeglądu różnic pomiędzy poszczególnymi kratownicami.

4. Podsumowanie

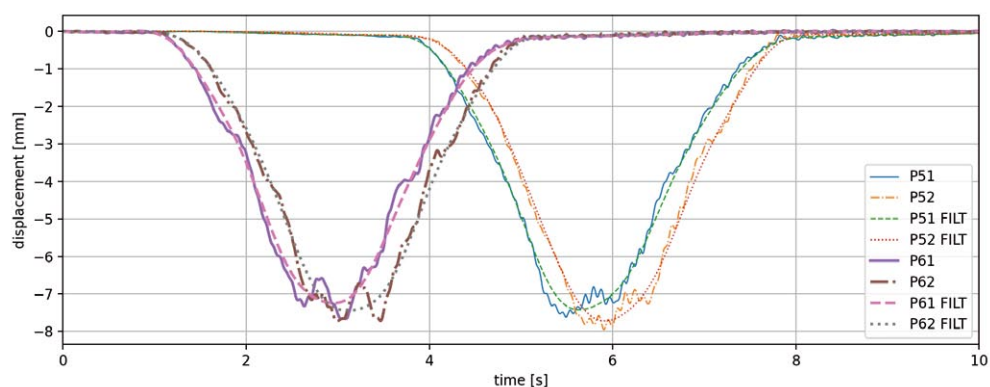
W artykule opisano zastosowanie operacyjnej analizy modalnej w badaniach kratowego mostu kolejowego o stosunkowo niewielkiej rozpiętości przęsła. W opisanym przypadku zastosowanie OMA umożliwiło jednoznaczny identyfikację kilku podstawowych modów. Zakres identyfikacji był wystarczający z perspektywy weryfikacji modelu numerycznego. Zidentyfikowane właściwości dynamiczne konstrukcji dosyć dobrze pokrywały się z tymi ze wstępnego modelu MES.

Dostępne wzbudzenia środowiskowe były niewystarczające do skutecznego wzbudzenia wyższych form drgań własnych uniemożliwiając ich identyfikację. Niemniej zakres identyfikacji był wystarczający, a użyteczne wyniki uzyskano bez zamykania ruchu na moście i bez wynajmowania kosztownego taboru próbnego.

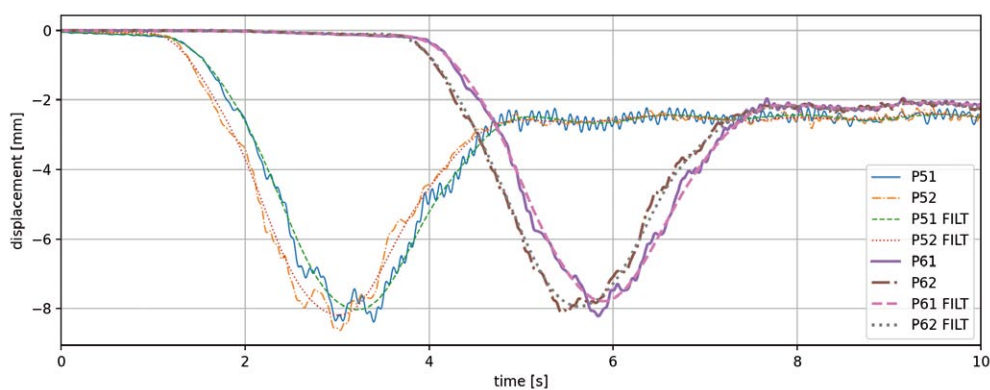
Badania pod normalnym ruchem nie pozwalają na estymację współczynnika przewyższenia dynamicznego (WPD) rozumianego jako stosunek ugięć wywołanych przejazdem z szeregiem wyższych prędkości do ugięć wywołanych tym samym taborem, ale przemieszczającym po konstrukcji z niewielką prędkością (przejazd quasi-statyczny). Wyznaczenie tego parametru nadal jest jednym z oczekiwanych efektów próby dynamicznej jednak jego użyteczność i zasadność odnoszenia do normowego współczynnika dynamicznego pozostaje dyskusyjna.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bień J., Mosty kolejowe – uszkodzenia, awarie, katastrofy, Materiały konferencyjne XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna, Szczecin-Międzdroje, 2009
- [2] Madej Ł., Ile jest mostów kolejowych w Polsce?, 08-Apr-2018. [(online), Available: <https://inzynieria.com/wpis-branzy/wiadomosci/6/51912,ile-jest-mostow-kolejowych-w-polsce>. (Accessed: 28-May-2019)



Rys. 5. Przemieszczenia pionowe wywołane przejazdem ciężkiej lokomotywy (L1); przęsło 6 – po lewej, przęsło 5 po prawej



Rys. 6. Przemieszczenia pionowe wywołane przejazdem pociągu towarowego (T3); przęsło 6 – po lewej, przęsło 5 po prawej

- [3] Andersson A., Karoumi R., Dynamics of railway bridges, analysis and verification by field tests, MATEC Web Conf., tom 24, 2015, str. 01001
- [4] Łaziński P., Pradelok S., Load Test of Railway Viaduct Built Using Crosswise Launching Technology, Procedia Engineering, tom 161, 2016, str. 530–537
- [5] Bień J., Krzyżanowski J., Rawa P., Zwolski J., Dynamic load tests in bridge management, Archives of Civil and Mechanical Engineering., tom 4, 2/2004, str. 63–78
- [6] Salamak M., O potrzebie standaryzacji badań odbiorczych obiektów mostowych pod próbnym obciążeniem dynamicznym, Inżynieria i Budownictwo, tom R. 70, 7/2014, str. 376–380
- [7] Zhang L., Brincker R., Andersen P., An Overview of Operational Modal Analysis: Major Development and Issues, in Proceedings of 1st IOMAC, Copenhagen, Denmark, 2005
- [8] Bień J., Rawa P., Zwolski J., Monitoring of Dynamic Parameters of Steel Bridges by Vibration Tests, 6th International Symposium on Steel Bridges, Prague, tom 31, 2006, str. 196–205
- [9] Dudek M., Wilde K., Identyfikacja parametrów dynamicznych mostu zespolonego w warunkach eksploatacyjnych, Inżynieria i Budownictwo, tom R. 63, 11/2007, str. 605–608
- [10] Poprawa G., Pradelok S., Salamak M., Łaziński P., Operational modal analysis in model updating of a truss railway bridge, in Proceedings of 7th IOMAC, Ingolstadt, 2017, str. 64–67
- [11] Gonzales I., Ülker-Kaustell M., Karoumi R., Seasonal effects on the stiffness properties of a ballasted railway bridge, Engineering Structures, tom 57, 12/2013, str. 63–72
- [12] Peeters B., De Roeck G., Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis, Mechanical Systems and Signal Processing, tom 13, 6/1999, str. 855–878
- [13] Marques F., Moutinho C., Magalhães F., Caetano E., Cunha Á., Analysis of dynamic and fatigue effects in an old metallic riveted bridge, Journal of Constructional Steel Research, tom 99, 8/2014, str. 85–101