

## ZASTOSOWANIE ANALIZY MODALNEJ DO DETEKЦИИ USZKODZENIA WIADUKTU

Krzysztof MENDROK

Akademia Górniczo – Hutnicza, Katedra Robotyki i Mechatroniki  
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, fax. 012 634 35 05, e-mail [mendrok@agh.edu.pl](mailto:mendrok@agh.edu.pl)

### Streszczenie

W pracy przedstawiono główne problemy eksploatacyjnej analizy modalnej dużych obiektów budownictwa lądowego. Skupiono się na trudnościach związanych ze specyfiką obiektów tj. gabarytami i niekorzystnymi wpływami otoczenia. Opisano badania modalne przeprowadzone na wiadukcie drogowym w celu określenia jego stanu technicznego. Wiadukt ten nie był wcześniej badany więc nie dysponowano modelem dla obiektu w stanie nieuszkodzonym co znacznie utrudniło ocenę stopnia jego uszkodzenia.

Słowa kluczowe: eksploatacyjna analiza modalna, ocena stanu konstrukcji.

### DAMAGE DETECTION OF THE VIADUCT WITH USE OF THE MODAL ANALYSIS

#### Summary

In the paper the main problems of the operational modal analysis of large civil engineering objects are presented. Author focused on the difficulties which come from the specificity of the objects, that is the large dimensions, negative influence of the environment. The modal analysis performed on the road viaduct for its damage assessment is described. There are no undamaged model data available, what made the damage assessment particularly difficult.

Keywords: operational modal analysis, damage assessment.

### 1. WPROWADZENIE

W dzisiejszych czasach dąży się do stałego monitoringu odpowiedzialnych obiektów inżynierii lądowej takich jak mosty, wysokie budynki, maszty czy kominy. Dotychczas stosowana inspekcja wizyjna wykonywana okresowo przez odpowiednie służby jest narzędziem o niewielkiej skuteczności. Ze względu na okresowość inspekcji istnieje niebezpieczeństwo nie wykrycia inicjacji i wzrostu uszkodzenia w okresie między przeglądami, a także brak możliwości stwierdzenia powstania uszkodzeń niewidocznych z zewnątrz. Nowoczesne systemy monitoringu obiektów inżynierii lądowej bazują na metodach opartych o zmianę własności dynamicznych (opartych na modelu). Do najczęściej wykorzystywanych w detekcji uszkodzeń parametrów dynamicznych należą parametry modelu modalnego obiektu tj. częstotliwości drgań własnych [1], współczynniki tłumienia modalnego [2] oraz wektory modalne [4], [5], [6]. Niejednokrotnie analizuje się też zmiany w charakterystykach częstotliwościowych monitorowanych obiektów [3]. W metodach wykrywania uszkodzeń bazujących na modelu modalnym, porównuje się wybraną wielkość zidentyfikowaną dla obiektu w stanie nieuszkodzonym, z wielkością bieżącą. Jeżeli wystąpią różnice wartości, istnieje podejrzenie że w układzie powstało uszkodzenie. W nowoczesnych

systemach monitoringu dla mostów jako wskaźnik uszkodzenia wykorzystuje się głównie zmianę częstotliwości drgań własnych obiektu. Podejście takie jest wygodne, gdyż wymaga zastosowania niewielkiej liczby czujników, ale obciążone jest dużym ryzykiem wystąpienia błędów związanych z wpływem warunków zewnętrznych. Zmiana tychże, może spowodować przesunięcie częstotliwości drgań własnych porównywalne z wywołanym przez wystąpienie w układzie uszkodzenia. Na przykład w wysokich letnich temperaturach sztywność obiektu maleje, a więc częstotliwości drgań własnych również się obniżają. Zjawisko to jest szczególnie wyraźne dla mostów drogowych z grubą warstwą asfaltu. Jego sztywność najbardziej zmienia się wraz z temperaturą. Podobny wpływ na własności dynamiczne ma zmiana wilgotności powietrza. Konstrukcja betonowa absorbuje wilgoć i jej masa rośnie, a co za tym idzie częstotliwości drgań własnych maleją. Dlatego, aby skutecznie i wiarygodnie wykorzystać metodę detekcji uszkodzeń opartą o zmiany częstotliwości drgań własnych, należy najpierw określić wrażliwość obiektu na zmiany warunków zewnętrznych. W niektórych pracach podejmowane są próby analitycznego wyznaczenia wpływu otoczenia na zmianę parametrów modalnych obiektu [1]. Najczęściej jednak stosuje się tablicę, w której zestawia się własności obiektu zidentyfikowane dla

różnych temperatur i wilgotności powietrza. Taka tablica jest unikatowa i sporządzana niezależnie dla każdego obiektu w wyniku szeregu eksperymentów. Bardziej zaawansowaną metodą wyeliminowania wpływu warunków pogodowych na skuteczność działania systemu monitoringu jest zastosowanie tzw. filtru środowiskowego [7]. Jest to najczęściej model autoregresyjny o ruchomej średniej (ARMA) zidentyfikowany na podstawie serii danych eksperymentalnych. Bez względu jednak na rodzaj wybranej metody detekcji uszkodzenia, niezbędne jest posiadanie modelu dla obiektu nieuszkodzonego. Danych takich nie ma dla większości omawianych obiektów. W Polsce sporą grupę obiektów drogowych typu mosty, wiadukty, estakady stanowią jeszcze konstrukcje z lat 80-tych, 70-tych, a niekiedy i starsze. Z drugiej strony w ostatnich 15 – 20 latach obserwuje się gwałtowny wzrost ilości pojazdów na drogach. Zwłaszcza liczba dużych ciężarówek – TIR'ów jest teraz nieporównywalnie wyższa. Wspomniane obiekty drogowe nie były przewidziane na taką intensywność użytkowania i dlatego mogą stanowić potencjalne zagrożenie dla użytkowników. Dla obiektów takich trudno jest przeprowadzić ocenę stanu technicznego z wykorzystaniem metod diagnostycznych opartych na modelu. Powodem jest tutaj wspomniany brak danych dla obiektu w stanie nieuszkodzonym. Jeden z takich przypadków został opisany w tym artykule. Jest to wiadukt drogowy, który na podstawie wizualnej oceny został zakwalifikowany do remontu. Badania modalne miały określić jak pilnie ów remont należy przeprowadzić.

## 2. PROBLEMY ANALIZY MODALNEJ OBIEKTÓW MOSTOWYCH

Dla wyznaczenia parametrów modelu modalnego obiektu w praktyce najczęściej wykorzystywana jest eksperymentalna analiza modalna (EMA) [8]. Istnieje szereg algorytmów EMA realizowanych zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości [8]. Wymagają one przeprowadzenia czynnego eksperymentu modalnego. W eksperymencie takim mierzone są odpowiedzi układu, najczęściej w postaci przyspieszenia drgań na zadane, mierzone wymuszenie. Wymuszenie realizowane jest najczęściej przy pomocy wzbudnika drgań elektrodynamicznego, hydraulicznego, lub młotka modalnego. Na podstawie zmierzonych przebiegów odpowiedzi i sił wymuszających estymowane są widmowe funkcje przejścia bądź odpowiedzi impulsowe. Dają one stosunkowo dokładne estymaty modelu modalnego, postaci drgań własnych (wektory modalne) uzyskane w ich wyniku są skalowane. Oznacza to, że przy ich pomocy można dokonać syntezy widmowych funkcji przejścia, przewidywać odpowiedź układu na zadane wymuszenie. Model modalny ze skalowanymi postaciami drgań własnych nadaje się też do symulacji modyfikacji strukturalnych

własności obiektu. Kolejną zaletą EMA jest, fakt, iż przy odpowiednim dobraniu wymuszenia można uzyskać wszystkie postacie drgań własnych w określonym paśmie częstotliwości. Wady metod EMA wynikają z konieczności zastosowania czynnego eksperymentu z mierzalnym wymuszeniem. Podejście takie wymaga wyłączenia badanego urządzenia z eksploatacji i odizolowania go od innych źródeł wymuszenia. Dla obiektów inżynierii lądowej takich jak mosty jest to bardzo trudne i najczęściej niemożliwe do zrealizowania. Pierwszą niedogodnością jest duża masa i sztywność układu. Skuteczne wymuszenie konstrukcji mostowej wymaga zastosowania bardzo drogiego hydraulicznego wzbudnika drgań dużej mocy. Na świecie istnieje bardzo niewiele tego typu urządzeń i zakup bądź wynajęcie jednego z nich w celu przeprowadzenia kilku pomiarów byłoby ekonomicznie nieuzasadnione. Równie trudne i kosztowne w realizacji byłoby odizolowanie obiektu od innych źródeł drgań. Stwarza to konieczność zatrzymania ruchu nie tylko na moście ale i na otaczających go ulicach, aby drgania gruntu wywołane przejazdem ciężkich samochodów nie przenosiły się na badany obiekt. Praktycznie niemożliwe jest odizolowanie badanego mostu od wpływu wiatru. Drgania wywołane wiatrem mogą w istotny sposób zakłócić czynny eksperyment modalny. Jedyną receptą jest wtedy przeprowadzenie pomiaru w dzień bezwietrzny, a to z kolei stoi w sprzeczności z zatrzymaniem ruchu, które trzeba planować i zgłaszać w odpowiednich instytucjach z dużym wyprzedzeniem.

Rozwiązaniem powyższych problemów jest zastosowanie eksploatacyjnej analizy modalnej (OMA) [9]. Algorytmy OMA umożliwiają wyznaczenie parametrów modelu modalnego na podstawie danych eksploatacyjnych, to znaczy, że pomiar odbywa się w czasie normalnej pracy obiektu. Rejestrowane są przyspieszenia drgań w wybranych punktach maszyny, jedna z odpowiedzi traktowana jest jako odniesienie, do którego liczone są funkcje korelacji lub wzajemnej gęstości widmowej mocy. Takie podejście umożliwia badanie obiektu w warunkach eksploatacyjnych, przy eksploatacyjnych wymuszeniach. Nie ma więc konieczności stosowania drogiego urządzeń wymuszających, ani izolowania obiektu badań od innych źródeł drgań. Wadą OMA jest to, że w wyniku otrzymuje się nieskalowane postacie drgań własnych. Należy także pamiętać, że w wyniku OMA estymowane są jedynie te postacie, które są wzbudzane wymuszeniem eksploatacyjnym. W przypadku badań opisanych w pracy dla celów diagnostycznych istotne były właśnie te postacie, które wymuszane są ruchem pojazdów i wiatrem, a znajomość skalowanych postaci drgań nie była konieczna. Mimo uniknięcia trudności związanych z przeprowadzeniem EMA, w czasie realizacji eksperymentu biernego napotkano na szereg innych utrudnień.

Gabaryty omawianego obiektu są duże (około 100 m długości), w związku z tym zachodziła konieczność stosowania długich, ciężkich przewodów i wielokrotnej zmiany pozycji sprzętu pomiarowego. Mimo zaangażowania dużego zespołu badaczy, alpinistów i samochodu z wysięgnikiem pomiar trwał powyżej 8 godzin. W związku z tym zmieniały się warunki eksperymentu wraz z upływem czasu. Rano i wieczorem temperatura powietrza była niższa o kilka stopni niż w godzinach południowych, ponadto w związku z przesuwaniem się słońca kolejno nagrzewały się różne partie mostu. Również ruch pojazdów w ciągu dnia zmieniał się. Duża ilość samochodów przejeżdżających przez wiadukt jednocześnie zmieniała masę obiektu. Kolejną konsekwencją faktu, iż pomiar odbywał się na obiekcie było narażenie badaczy i sprzętu na opady atmosferyczne. Podczas badań napotkano też na poważne trudności związane z zasilaniem aparatury pomiarowej. Przygotowane akumulatory podczas pomiarów bardzo szybko się rozładowywały. Innym sposobem zasilania w warunkach polowych jest zastosowanie generatora. Należy jednak zwrócić uwagę aby generator był przystosowany do pracy z urządzeniami elektronicznymi, tzn. posiadał odpowiedni układ redukujący poziom zakłóceń.

### 3. OBIEKT ANALIZY

Obiektem analizy był wiadukt drogowy nad ulicą Brzeźnicką w Bochni. Wiadukt ten jest częścią międzynarodowej drogi E 40 pomiędzy Krakowem i Tarnowem. Ruch na tym odcinku drogi jest szczególnie intensywny. Wiadukt składa się z pięciu przęseł o rozpiętości 18,94 + 19,53 + 19,62 + 19,61 + 18,70 = 96,40 m. Całkowita szerokość wiaduktu wynosi 11,40 m, w tym: jezdnia - 7,00 m oraz pobocza - 2 \* 2,00 m. Zdjęcie omawianego obiektu pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Widok badanego wiaduktu

Schematem statycznym wiaduktu jest rama pięcioprzęsłowa. Konstrukcja nośna jest wykonana z prefabrykowanych belek sprężonych o rozpiętości

18,00 m. Nad filarami belki te są uciągłone i połączone z odczepami filarów. W przekroju poprzecznym występuje 8 belek w rozstawie osiowym 1,50 m. Z belkami prefabrykowanymi współpracuje żelbetowa płyta pomostu o grubości 12 ÷ 18 cm.

Podpory wiaduktu są słupowe: przyczółki dwusłupowe, filary jednosłupowe. Wszystkie podpory są posadowione na palach żelbetowych. Wizualna inspekcja wiaduktu określiła jego stan techniczny jako bardzo zróżnicowany. Podczas oceny tej stwierdzono, że w dobrym stanie znajdują się podpory. O wiele gorszy jest stan belek głównych, zwłaszcza skrajnych. Wystąpiły w nich ubytki betonu oraz zarysowania. Bardzo zróżnicowany jest stan żelbetowej płyty pomostu – od złego (wystąpiła konieczność lokalnych wzmocnień) do dobrego.

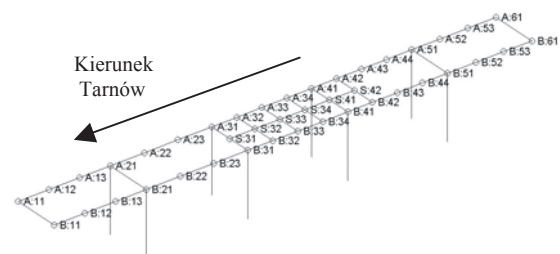
Zróżnicowanie stanu technicznego oraz stopień zagrożenia jego dalszej eksploatacji skłoniły administratora obiektu do przeprowadzenia szczegółowych badań. Ich wyniki są przedstawione w artykule.

### 4. EKSPERYMENT MODALNY

Eksperyment modalny na przedstawionym wiadukcie przeprowadzono 14 lutego 2006 roku. W czasie pomiarów wykorzystano wymuszenie eksploatacyjne w postaci ruchu pojazdów po jezdni wiaduktu. Sieć punktów pomiarowych składała się z 42 punktów i została podzielona na trzy komponenty (grupy):

- 18 punktów rozmieszczonych wzdłuż lewego skrajnego dźwigara,
- 18 punktów rozmieszczonych wzdłuż prawego skrajnego dźwigara,
- 6 punktów rozmieszczonych wzdłuż czwartego dźwigara od prawej strony na środkowym przęśle.

Przyjętą sieć punktów pomiarowych jest przedstawiona na rysunku 2.



Rys. 2. Rozkład punktów pomiarowych na wiadukcie

Czujniki mocowano do spodniej powierzchni dźwigarów. Z uwagi na wysokość obiektu do pomiaru zostali zatrudnieni dwaj alpinisci i ciężarówka z wysięgnikiem. Grupa czujników zamocowana na wiadukcie została pokazana na rys. 3.

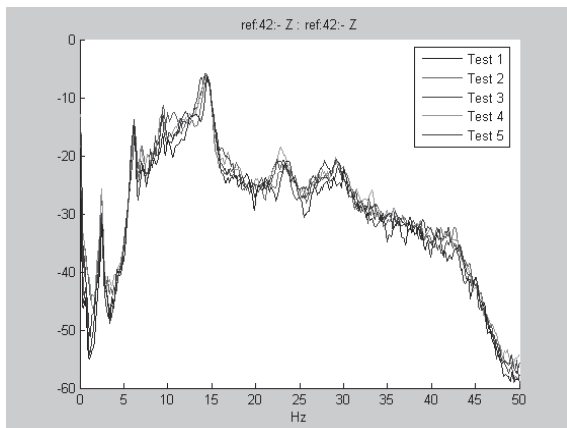


Rys. 3. Czujniki zamocowane na dźwigarze wiaduktu

Rejestrowano 900 sekundowe przebiegi czasowe przyspieszenia drgań z częstotliwością próbkowania 100 Hz. Tak długi czas rejestracji był niezbędny aby uzyskać wysoką rozdzielczość częstotliwościową do dalszych analiz oraz aby zapewnić możliwe jednorodne warunki wymuszenia w każdym z pięciu eksperymentów częściowych. W każdej rejestracji mierzono 9 sygnałów odpowiedzi i jeden przebieg odniesienia. Do akwizycji danych zastosowano rejestrator cyfrowy TEAC GX-1 w konfiguracji 16-to kanałowej oraz 10 akcelerometrów sejsmicznych PCB 393A03.

## 5. EKSPLOATACYJNA ANALIZA MODALNA OBIEKTU

Estymację parametrów modalnych poprzedziła analiza jakości danych pomiarowych w oparciu o przebiegi zmierzone w punkcie pomiaru referencyjnego we wszystkich przeprowadzonych eksperymentach częściowych. Na rys. 4 pokazano przebiegi widm amplitudy sygnału referencyjnego.



Rys. 4. Widma amplitudy przyspieszenia drgań ( $\text{dB m/s}^2$ ) w punkcie referencyjnym w 5 eksperymentach częściowych

Przebiegi te pokazują, że we wszystkich eksperymentach częściowych przebieg widma jest podobny co oznacza, że wymuszenie było odpowiednie w każdym z testów.

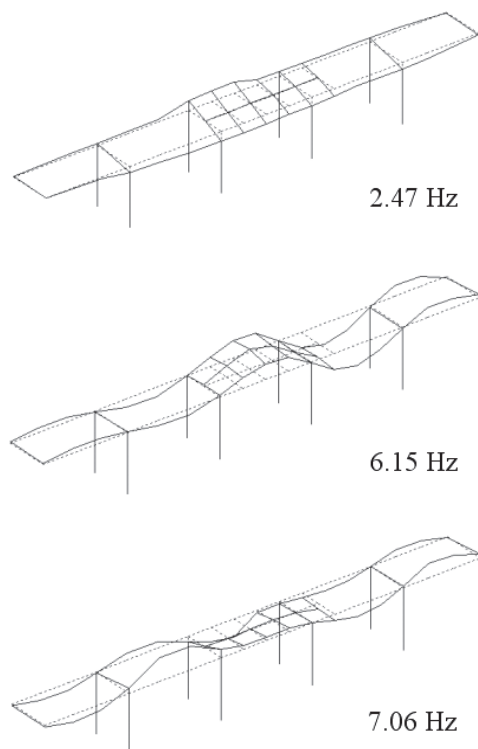
Estymacja parametrów była przeprowadzona

przy pomocy modułu oprogramowania MDOF pakietu oprogramowania do analizy modalnej VIOMA [9]. Zastosowano algorytmy LSCE i BR. Przeprowadzono zbiór procedur estymacji, z których wyników wybrano najbardziej reprezentatywne postacie drgań przy pomocy autorskiej procedury konsolidacji modelu modalnego [10] będącej składnikiem oprogramowania VIOMA.

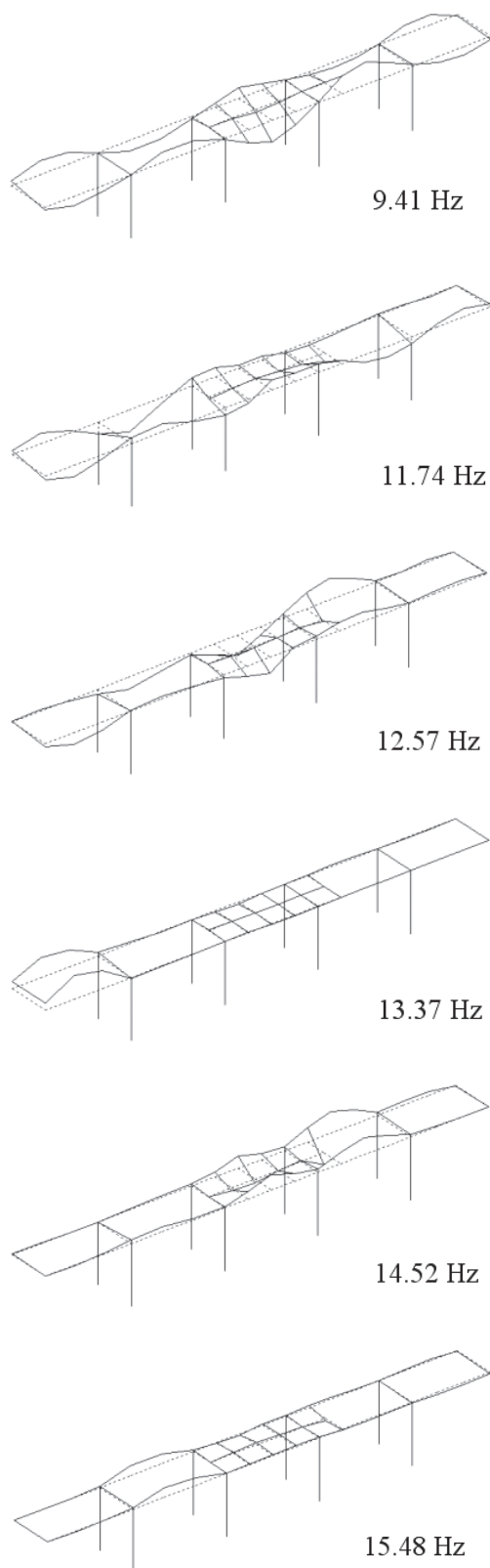
Wyniki estymacji parametrów modelu modalnego zestawiono w tabeli 1. Zidentyfikowane postacie drgań własnych przedstawione są na rys. 5a i rys. 5b.

Tab. 1. Wyniki identyfikacji modelu modalnego wiaduktu

Nr PDW	Częstotliwość [Hz]	Współczynnik tłumienia [%]
1	2.47	4.65
2	6.15	2.64
3	7.06	3.18
4	9.41	2.46
5	11.74	2.96
6	12.57	1.41
7	13.37	1.45
8	14.52	1.91
9	15.48	0.29



Rys. 5a. Zidentyfikowane postacie drgań własnych wiaduktu



Rys. 5b. Zidentyfikowane postacie drgań własnych wiaduktu

Dla badanego wiaduktu przeprowadzono dodatkową analizę. Częstotliwości drgań własnych i współczynniki tłumienia modalnego zostały wyznaczone osobno dla każdego z trzech

zmierzonych dźwigarów. Porównanie otrzymanych wyników zamieszczono w tabeli 2.

Tab. 2. Porównanie parametrów modelu modalnego wyznaczonych osobno dla każdego z badanych dźwigarów

Skrajny lewy dźwigar (A)		4-ty dźwigar od prawej (S)		Skrajny prawy dźwigar (B)	
CzDW [Hz]	Wsp. tł.	CzDW [Hz]	Wsp. tł.	CzDW [Hz]	Wsp. tł.
2.49	3.29	2.49	3.15	2.50	3.53
6.09	2.46	6.18	2.64	6.14	2.46
7.08	3.15	7.11	3.83	7.01	2.96
9.29	2.34	9.56	2.66	9.34	2.85
14.51	1.56	14.57	2.65	14.53	1.58

Analizując wartości częstotliwości drgań własnych poszczególnych dźwigarów zawarte w tabeli 2 można zauważyć, że zewnętrzne dźwigary są mniej sztywne od wewnętrznego. Może to być symptomem znacznie większego zużycia tych elementów. Aby dokładniej określić przyczynę mniejszej sztywności skrajnych dźwigarów należy zastosować inną metodę nieniszczących badań uszkodzenia obiektu np. metodę dostrajania modelu elementów skończonych. Podobne wnioski, dotyczące mniejszej sztywności zewnętrznej części wiaduktu, można wyciągnąć obserwując kształt postaci drgań własnych wiaduktu. Widoczna jest wyższa względna amplituda przemieszczeń tych części obiektu (na postaciach przedstawiających zginanie).

W tabeli 3 zawarto współczynniki MAC policzone pomiędzy odpowiednimi postaciami drgań własnych badanych dźwigarów w celu ilościowej oceny różnicy względnych amplitud dźwigarów w postaciach zginania.

Tab. 3. Zestawienie współczynników MAC dla kolejnych dźwigarów.

Nr PDW	MAC pomiędzy $A^1$ i $B^2$	MAC pomiędzy $A^1$ i $S^3$	MAC pomiędzy $B^2$ i $S^3$
2	0.8015	0.4916	0.7218
3	0.8484	0.9376	0.9344
5	0.5242	0.0649	0.4090
6	0.7210	0.4841	0.4501
8	0.9756	0.2973	0.2873

1) skrajny lewy dźwigar  
2) skrajny prawy dźwigar  
3) 4-ty dźwigar od prawej

Współczynniki MAC zestawione w tabeli 3 potwierdzają różnicę w kształcie postaci wyestymowanych dla kolejnych dźwigarów. Wartości MAC'ów pomiędzy skrajnymi dźwigarami są wysokie natomiast pomiędzy skrajnymi a środkowym niskie. W połączeniu z obserwacją kształtu postaci można na tej podstawie wnioskować

o utracie sztywności skrajnych dźwigarów, na które działają większe obciążenia w trakcie eksploatacji.

## 6. PODSUMOWANIE

Wyniki zaprezentowane w artykule ukazują przydatność eksploatacyjnej analizy modalnej do oceny stanu technicznego obiektów inżynierii lądowej takich jak mosty, czy wiadukty. Metoda została użyta do takiej oceny intensywnie eksploatowanego wiaduktu drogowego, aby wspomóc zarząd dróg i mostów w podjęciu decyzji o terminie i zakresie prac remontowych.

Metoda może też być zastosowana do ciągłego monitoringu stanu omawianych obiektów. Jeżeli znany będzie trend zmiany parametrów modalnych, możliwe będzie także określenie czasu jego bezpiecznej eksploatacji. Częstotliwości drgań własnych i współczynniki tłumienia modalnego mogą być wykorzystywane jako wskaźniki wystąpienia uszkodzenia.

## LITERATURA

- [1].Betti, R., Testa, R. B.: *Vibration and Damage Control for Long-Span Bridges*, Journal of Smart Materials and Structures, Vol. 4, s. 91-100, 1995.
- [2].Kawiecki, G.: *Modal Damping Measurements for Damage Detection*, European COST F3 Conference on System Identification and Structural Health Monitoring, Madrid, Spain, 651-658, 2000.
- [3].Agneni A., Crema, L., and Mastroddi F.: *Damage Detection from Truncated Frequency Response Functions*, European COST F3 Conference on System Identification and Structural Health Monitoring, Madrid, Spain, 137-146, 2000.
- [4].Ho, Y. K., Ewins, D. J., *Numerical Evaluation of the Damage Index*, Structural Health Monitoring 2000, Stanford University, Palo Alto, CA, 995-1011, 1999.
- [5].Wang, M. L., Xu, F. L., Lloyd, G. M.: *A Systematic Numerical Analysis of the Damage Index Method Used for Bridge Diagnostics*, Smart Structures and Materials 2000: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, Proceedings of SPIE, Vol. 3988, Newport Beach, CA, pp. 154-164, 2000.
- [6].Carrasco, C., Osegueda, R., Ferregut, C., Grygier, M.: *Localization and Quantification of Damage in a Space Truss Model Using Modal Strain Energy*, Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, Proceedings of SPIE, Vol. 3043, pp. 181- 192, 1997.
- [7].Peeters B., Maeck J., De Roeck. G.: *Dynamic monitoring of the Z24-bridge: separating temperature effects from damage*, In Proceedings of the European COST F3 Conference on System Identification and Structural Health Monitoring, s. 377-386, Madrid, Spain, Lipiec 2000.
- [8].Uhl T.: *Komputerowe wspomaganie identyfikacji modeli konstrukcji*, WNT, Warszawa, 1997.
- [9].Uhl T., Lisowski W.: *In-operation modal analysis*, Wydawnictwo KRiDM AGH, Kraków, 2001.
- [10].Lisowski W.: *Przykład algorytmu konsolidacji modelu w autonomicznej analizie modalnej*, Zagadnienia analizy modalnej konstrukcji mechanicznych praca zbiorowa pod redakcją Tadeusza Uhl, Wydawnictwo KRiDM AGH, Kraków, 2003.

Dr inż. **Krzysztof**

**MENDROK** jest adiunktem w Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn, Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie. Jego zainteresowania skupiają się na zagadnieniach dynamiki strukturalnej, a zwłaszcza na algorytmach analizy modalnej i analizy dróg rozchodzenia się energii drgań w konstrukcjach. Zajmuje się wykorzystaniem tych metod do wykrywania uszkodzeń i identyfikacji sił. Jest autorem prac podejmujących tę tematykę.

