

LOKALIZACJA USZKODZENIA Z ZASTOSOWANIEM FILTRACJI MODALNEJ – WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA

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

Streszczenie

Filtracja modalna ma wiele zastosowań w analizie dynamiki obiektów. Ostatnio w piśmiennictwie naukowym można znaleźć przykłady zastosowania filtracji modalnej do wykrywania uszkodzeń. Filtr modalny służy do rozkładu odpowiedzi układu na składowe związane z kolejnymi współrzędnymi modalnymi. Gdy więc filtrujemy widmowe funkcje przejścia układu, na wyjściu filtru pojawia się charakterystyka z jednym tylko maksimum, związanym z częstotliwością drgań własnych, na którą filtr był nastrojony. Zmiany strukturalne (np. spadek sztywności lub masy związane z uszkodzeniem) powodują pojawienie się dodatkowych pików na charakterystyce wyjściowej filtru. Filtr modalny jest więc świetnym narzędziem do detekcji uszkodzeń o następujących zaletach: niewielkie wymagania obliczeniowe, łatwość automatyzacji, niewrażliwość na zmiany warunków zewnętrznych. Posiada jednak istotną wadę – nie daje informacji o miejscu wystąpienia uszkodzenia. Artykuł przedstawia rozwiązanie, które likwiduje tę wadę. Pokazana metoda jest najpierw sprawdzana na danych symulacyjnych, a następnie na przebiegach zarejestrowanych podczas eksperymentu laboratoryjnego.

Słowa kluczowe: filtr modalny, wykrywanie uszkodzeń, lokalizacja uszkodzeń.

DAMAGE LOCATION WITH USE OF MODAL FILTERING – EXPERIMENTAL VERIFICATION

Summary

Modal filtering has numerous applications in analysis of objects dynamics. Lately in the literature one can find an example of use of modal filtering for damage detection. Modal filter decomposes the system responses into the modal coordinates, and thus, on the output of the filter, one has the frequency response with only one peak corresponding to the natural frequency to which the filter was tuned. Structural modification (e.g. drop of stiffness or mass due to damage) causes appearance of spurious peaks on the output of the modal filter. Modal filter is, therefore, a great indicator of damage detection with such advantages as low computational effort due to data reduction, easiness of automation and lack of sensitivity to environmental changes. It has however one serious fault – it does not provide any information about damage location. The paper presents a solution, that liquidates this disadvantage. Proposed method is first tested on numerical example and than on the data recorded during laboratory experiments.

Keywords: modal filter, damage detection, damage localization.

1. WPROWADZENIE

Jedną z grup metod stosowanych w nieniszczącym wykrywaniu uszkodzeń, są metody oparte o zmiany wielkości związanych z dynamiką badanych obiektów. Główną ideą tych metod jest diagnostyka oparta na modelu, a więc porównywanie parametrów modalnych zidentyfikowanych dla obiektu nieuszkodzonego z tymi odczytanymi w stanie bieżącym. Różnica w porównywanej wielkości może wskazywać na uszkodzenie [5]. Najlepszym modelem, który można zastosować w opisanym podejściu wydaje się być model modalny, a więc zbiór częstotliwości drgań własnych (CzDW), modalnych współczynników tłumienia i postaci drgań własnych (PDW)

opisujących dynamikę badanego obiektu. Model modalny jest stosunkowo prosty do identyfikacji, a dzięki algorytmom eksploatacyjnej analizy modalnej może być estymowany na podstawie jedynie odpowiedzi układu. Cecha ta czyni go bardzo przydatnym w diagnostyce. Jednakże aplikacja modelu modalnego do diagnostyki opartej na modelu ma kilka wad i ograniczeń. Po pierwsze istnieje poważny problem z rozróżnieniem zmian parametrów modalnych wynikających z uszkodzenia od tych spowodowanych zmianami warunków zewnętrznych np. temperatury czy wilgotności. Kolejną trudnością jaką napotyka się w diagnostyce opartej na modelu modalnym jest niemożliwość pełnej automatyzacji procedur wykrywania uszkodzenia. Mimo, że prace nad automatyzację

procedur analizy modalnej prowadzone są intensywnie w wielu ośrodkach badawczych, w chwili obecnej nie da się w praktyce uniezależnić jej od ingerencji inżyniera – badacza [7]. Taki stan rzeczy powoduje, że symptomy diagnostyczne w postaci CzDW czy PDW są estymowane okresowo i zależą w pewnym stopniu od subiektywnej oceny badacza przeprowadzającego analizę.

Wszystkie te ograniczenia nie mają znaczenia, gdy do detekcji uszkodzeń zostanie zastosowana filtracja modalna w sposób opisany w [1], [2]. Widmowa funkcja przejścia (WFP) badanego obiektu przefiltrowana filtrem modalnym ma tylko jedno maksimum odpowiadające CzDW, na którą filtr był nastawiony. Gdy w obiekcie wystąpi lokalna zmiana macierzy sztywności czy mas (jest to przeważnie wywołane przez uszkodzenie), filtr modalny przestaje działać i w charakterystyce na jego wyjściu pojawiają się piki odpowiadające innym, niezupełnie odfiltrowanym CzDW. Z drugiej strony globalne zmiany macierzy mas czy sztywności wywołane zmianami warunków zewnętrznych nie zaburzają pracy filtru i charakterystyka na jego wyjściu ma wciąż jeden pik nieznacznie przesunięty w dziedzinie częstotliwości [1]. Takie podejście ma jednak pewną wadę – nie daje informacji na temat lokalizacji uszkodzenia. Wynika to z faktu, że wszystkie WFP badanego obiektu są filtrowane wspólnie i w pewien sposób uśredniane. Możliwe jest jednak zbudowanie filtru modalnego wykorzystującego tylko wybrane punkty pomiarowe. Kolejną istotną informacją jest to, iż PDW są zaburzane na skutek uszkodzenia tylko lokalnie – przynajmniej w początkowej fazie jego rozwoju. Te dwie informacje stwarzają możliwość do lokalizacji uszkodzenia z pewnym przybliżeniem metodą filtracji modalnej. Można to uzyskać poprzez podział filtrowanych charakterystyk na grupy odpowiadające kolejnym obszarom badanego obiektu.

2. WYKRYWANIE USZKODZEŃ PRZY POMOCY FILTRACJI MODALNEJ

Filtr modalny został po raz pierwszy opisany przez Baruha i Maierovitcha w 1983 roku [3]. Zastosowali go do zwalczania zjawiska „spillover”, czyli ucieczki strumienia energii przeznaczonej do sterowania drganiami wybranych postaci drgań własnych do innych, wyższych postaci drgań. Filtr modalny służy do rozkładu odpowiedzi układu na składowe związane z poszczególnymi PDW, poprzez transformację ze współrzędnych fizycznych – związanych z siecią punktów pomiarowych – na współrzędne modalne [4].

Dla potrzeb budowy filtru modalnego został zdefiniowany nowy parametr modalny – wzajemny wektor własny. Ma on z definicji taką własność, iż jest prostopadły do wszystkich wektorów modalnych z wyjątkiem tego, który odpowiada CzDW, na którą filtr modalny jest nastawiony. Dzięki temu można,

budując macierz wzajemnych wektorów modalnych, dokonać rozkładu odpowiedzi układu na składowe związane z kolejnymi współrzędnymi modalnymi η_r .

$$\eta_r(\omega) = \Psi_p^T \cdot \{x(\omega)\} \quad (1)$$

gdzie: Ψ_p – macierz wzajemnych wektorów modalnych

$\{x(\omega)\}$ – wektor odpowiedzi układu.

Proces wyznaczania wzajemnych wektorów modalnych rozpoczyna się od założenia, że reszta modalna R_{pp} ma formę urojoną:

$$R_{pp} = j \cdot 1 \quad (2)$$

Następnie wyznaczana jest charakterystyka $H_{pp}(j\omega)$ o jednym stopniu swobody:

$$H_{pp}(\omega) = \frac{R_{pp}}{j\omega + \lambda_r} + \frac{R_{pp}^*}{j\omega + \lambda_r^*} \quad (3)$$

gdzie: λ_r - r -ty biegun układu.

Dla założonego zakresu częstotliwości powyższa WFP jest określana w k wartościach:

$$H_{pp}(\omega) = [H_{pp}(\omega_1) \ H_{pp}(\omega_2) \ \dots \ H_{pp}(\omega_k)]^T \quad (4)$$

Przy założeniu, że podczas eksperymentu wykorzystywano pojedyncze wymuszenie, a odpowiedzi były mierzone w N punktach, macierz pomiarowych WFP ma rozmiar $k \times N$:

$$H_{kN}(\omega) = \begin{bmatrix} H_1(\omega_1) & H_2(\omega_1) & \dots & H_N(\omega_1) \\ H_1(\omega_2) & H_2(\omega_2) & \dots & H_N(\omega_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_1(\omega_k) & H_2(\omega_k) & \dots & H_N(\omega_k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Macierze WFP wyrażone wzorami (4) i (5) służą do wyliczenia macierzy wzajemnych wektorów modalnych Ψ_p :

$$\Psi_p = H_{kN}^+ \cdot H_{pp} \quad (6)$$

Gdy uszkodzenie pojawi się w badanym obiekcie, wywołuje to w większości przypadków lokalny spadek sztywności. Zmienia się więc macierz sztywności modelu obiektu i w wyniku rozwiązania zagadnienia własnego [6] zarówno wartości własne (CzDW) jak i wektory własne (PDW) ulegają zmianie. Różnice to powodują, że wzajemne wektory własne wyliczone dla obiektu bez uszkodzenia nie są już ortogonalne do wektorów modalnych i w konsekwencji filtr modalny nie działa poprawnie. Gdy natomiast nastąpi globalna zmiana, którejś z macierzy modelu układu – zmiany takie wynikają najczęściej z różnic w warunkach otoczenia – wektory modalne nie ulegają

modyfikacji, jak pokazano w [1] i filtr modalny nadal działa poprawnie.

3. LOKALIZACJA USZKODZEŃ PRZY POMOCY FILTRACJI MODALNEJ

Jak już wcześniej powiedziano wadą przedstawionego podejścia jest brak informacji o miejscu uszkodzenia. Ze wzoru (1) wynika, że wszystkie odpowiedzi układu (lub widmowe funkcje przejścia) są filtrowane jednocześnie i na wyjściu filtru pojawia się jedna charakterystyka. Pomysł autora na rozszerzenie działania metody opiera się na fakcie, iż uszkodzenie powoduje w większości przypadków tylko lokalną zmianę kształtu PDW widoczną w najbliższym jego otoczeniu (zgłasza w początkowym jego stadium). Dzięki temu faktowi inne metody wykrywania uszkodzeń oparte o analizę kształtu PDW tak dobrze nadają się do ich lokalizacji. Można więc podzielić obiekt na obszary mierzone przy pomocy kilku czujników i budować osobne filtry modalne dla danych pochodzących z tych tylko czujników. W obszarach, gdzie nie ma uszkodzenia, kształt postaci drgań własnych PDW nie zmienia się i na wyjściu filtru modalnego otrzymywane są charakterystyki z jednym maksimum. Gdy rozważana jest grupa czujników z obszaru bliskiego uszkodzeniu, kształt PDW zmienia się i charakterystyki nie są filtrowane idealnie.

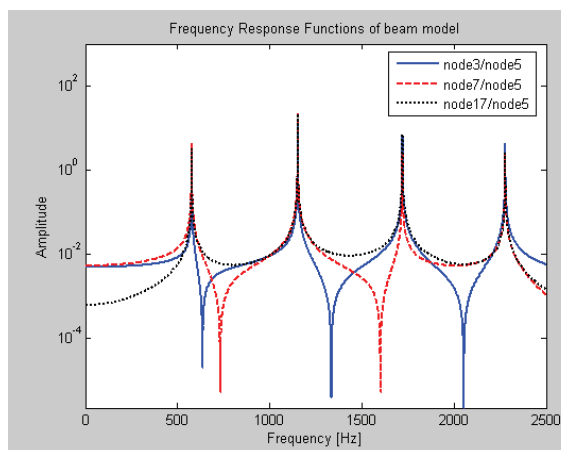
Teoria filtru modalnego mówi, że minimalna liczba czujników potrzebna do zbudowania efektywnego filtru modalnego musi być nie mniejsza niż liczba PDW branych do analizy [4]. Gdy zatem ograniczymy pasmo analizy do 2 pierwszych CzDW, teoretycznie możliwe byłoby budowanie filtrów dla obszarów, na których pomiar odbywa się przy pomocy jedynie 2 czujników. Zwiększyłyby to dokładność lokalizacji uszkodzenia. W praktyce jednak, aby uzyskać skuteczny filtr modalny, przy ograniczeniu pasma do 2 pierwszych CzDW należy zastosować około 4 – 5 czujników. Dokładność wyznaczenia miejsca uszkodzenia będzie więc mniejsza i będzie silnie zależała od gęstości zastosowanej siatki pomiarowej. Paradoksalnie dokładność wykrywania uszkodzenia będzie odwrotnie proporcjonalna do jego wielkości, ponieważ im większe uszkodzenie tym bardziej rozległy jego wpływ na kształt PDW.

Ponieważ budowa tak dużej liczby filtrów modalnych znacznie zwiększyłaby czas obliczeń, autor zaproponował algorytm, w którym proces lokalizacji uszkodzenia będzie inicjowany dopiero po jego wykryciu. To znaczy najpierw budowany będzie tylko jeden filtr dla wszystkich charakterystyk i dopiero w momencie wykrycia uszkodzenia – pojawienia się dodatkowych maksimum na wyjściu filtru, będą wykonywane dodatkowe analizy. Procedura postępowania przy wykrywaniu i lokalizacji uszkodzenia z zastosowaniem zaproponowanej techniki powinna wyglądać następująco:

1. Obliczenia wstępne – analiza modalna obiektu, wyznaczenie wzajemnych wektorów modalnych dla obiektu nieuszkodzonego całego i dla obszarów.
2. Pomiar charakterystyk układu w stanie bieżącym i ich filtracja.
3. W razie wykrycia uszkodzenia w wyniku działania punktu nr 2 procedury, filtracja wybranych grup charakterystyk.

4. WERYFIKACJA SYMULACYJNA PRZEDSTAWIONEJ METODY

Tak sformułowana metoda została następnie sprawdzona z zastosowaniem układu symulacyjnego. Testowany układ symulacyjny miał charakter zbliżony do układu rzeczywistego. Był to model elementów skończonych belki podpartej na obu końcach. Model zbudowany był w środowisku MSC Patran z 20 elementów typu belkowego – 21 węzłów (wirtualnych punktów pomiarowych). Wybrane WFP modelu pokazano na rysunku 1.

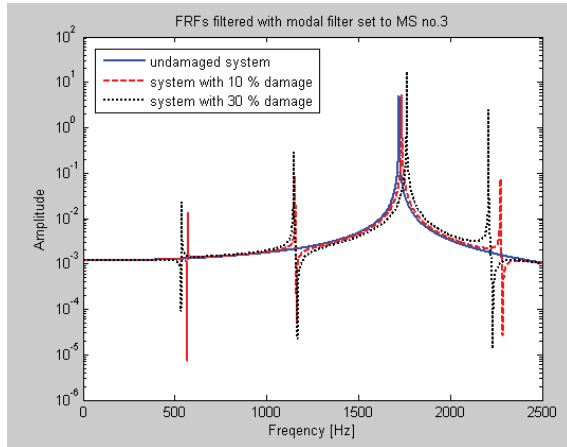


Rys. 1. Przykładowe WFP symulowanego układu

Tak postępowanie podczas weryfikacji metody był następujący: rozwiązano zagadnienie własne dla modelu, skonstruowano filtr modalny dla wszystkich czujników i dla grup czujników odpowiadających kolejnym obszarom modelu. Ponieważ dysponowano większą liczbą punktów, obiekt podzielono tak, aby w każdej analizie liczba punktów pozwalała na pełną filtrację (przebieg na wyjściu filtra zawierający tylko 1 pik) po zawężeniu pasma do 2 pierwszych częstotliwości drgań własnych. Minimalna liczba punktów, która pozwoliła to osiągnąć dla opisywanego przypadku wynosiła 5. W następnym etapie przeprowadzono dwie kolejne symulacje z przekrojem poprzecznym elementu nr 17 zmniejszonym o odpowiednio 10 i 30 % - uszkodzenie. WFP uszkodzonych modeli filtrowano modalnie tak jak wskazuje opisywana procedura.

Wyniki filtracji dla wszystkich węzłów oraz kolejnych grup węzłów przed i po uszkodzeniu

zaprezentowano na rysunkach 2 i 3. W tym przykładzie dwie pierwsze grupy czujników nie wskazały uszkodzenia. Kolejna grupa wykazuje, że istnieją różnice w PDW w analizowanym obszarze przed i po uszkodzeniu. Różnice te narastają w grupie czujników bezpośrednio otaczających obszar uszkodzenia – ostatni rysunek.

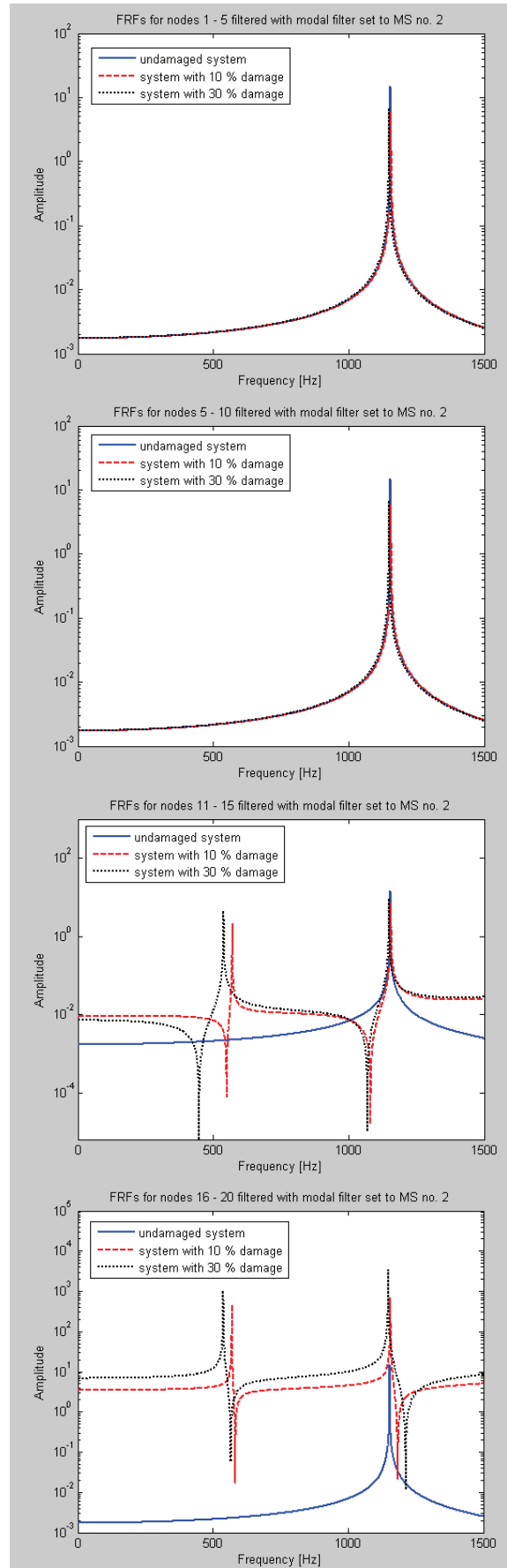


Rys. 2. Wyniki filtracji modalnej wszystkich WFP układu przed i po uszkodzeniu

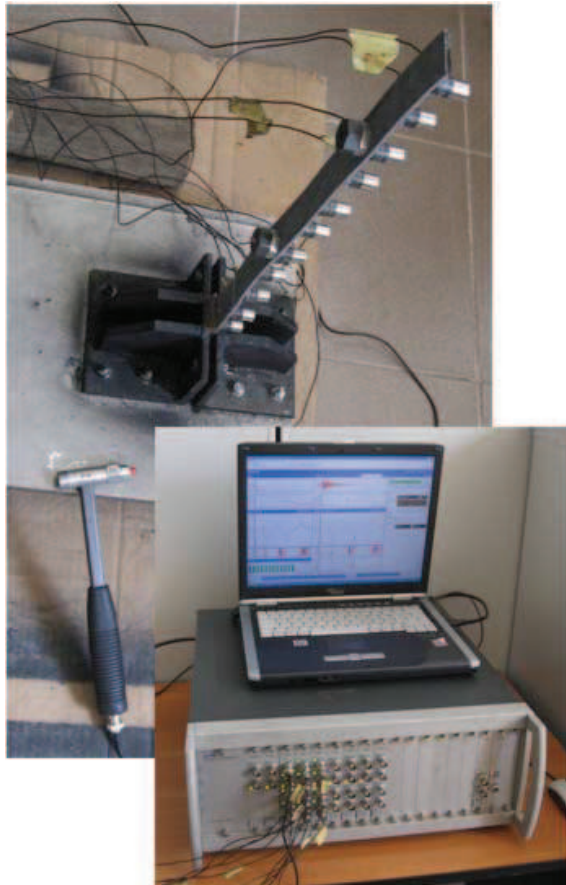
Gdyby stosować automatyczną procedurę detekcji uszkodzenia opartą o znajdowanie dodatkowych pików na filtrowanych WFP okazałoby się, że uszkodzenie znajduje się gdzieś pomiędzy czujnikami 11 i 21. Gdyby dodatkowo analizować względną wysokość nieodfiltrowanych pików obszar dałoby się zawęzić do zakresu 16 – 21.

6. WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA

Po pozytywnej weryfikacji symulacyjnej proponowanej metody lokalizacji uszkodzeń, wykonano serię eksperymentów laboratoryjnych w celu sprawdzenia skuteczności działania metody dla danych pochodzących z pomiarów obiektów fizycznych. Obiektem badań była stalowa belka utwierdzona. Podczas eksperymentów zastosowano wymuszenie impulsowe. Mierzono odpowiedzi obiektu w postaci przyspieszeń drgań w 11 punktach pomiarowych, równo rozmieszczonych na długości obiektu. Punkty numerowano od utwierdzenia kolejno od 1 do 11. Zdjęcie stanowiska pomiarowego pokazano na rysunku 4. Przeprowadzono 3 eksperymenty modalne przy identycznych warunkach zewnętrznych i bez przemieszczania czujników. Mierzono jednocześnie wszystkie 11 odpowiedzi i nie zdejmowano czujników pomiędzy eksperymentami, gdyż nawet najmniejsza zmiana położenia czujników mogłaby zaburzyć działanie metody.

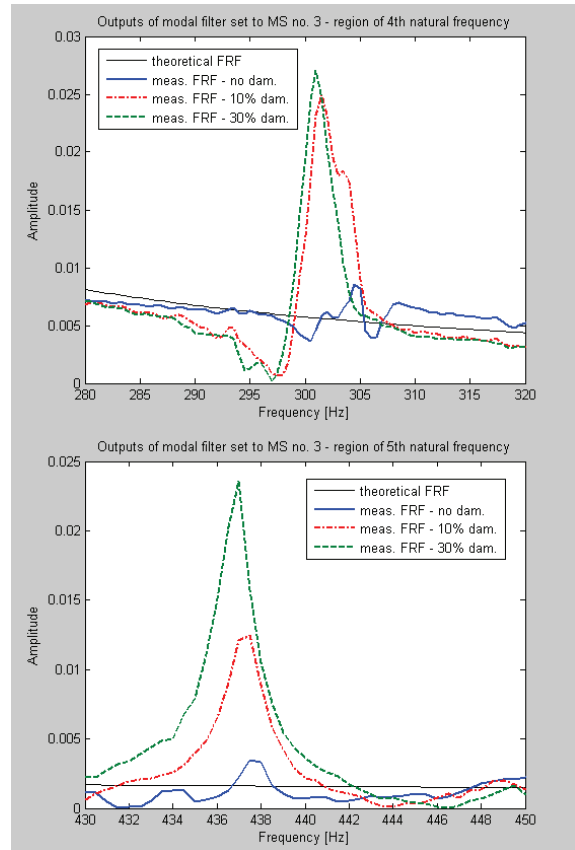


Rys. 3. Wyniki filtracji modalnej kolejnych grup WFP układu przed i po uszkodzeniu



Rys. 4. Stanowisko do badań eksperymentalnych

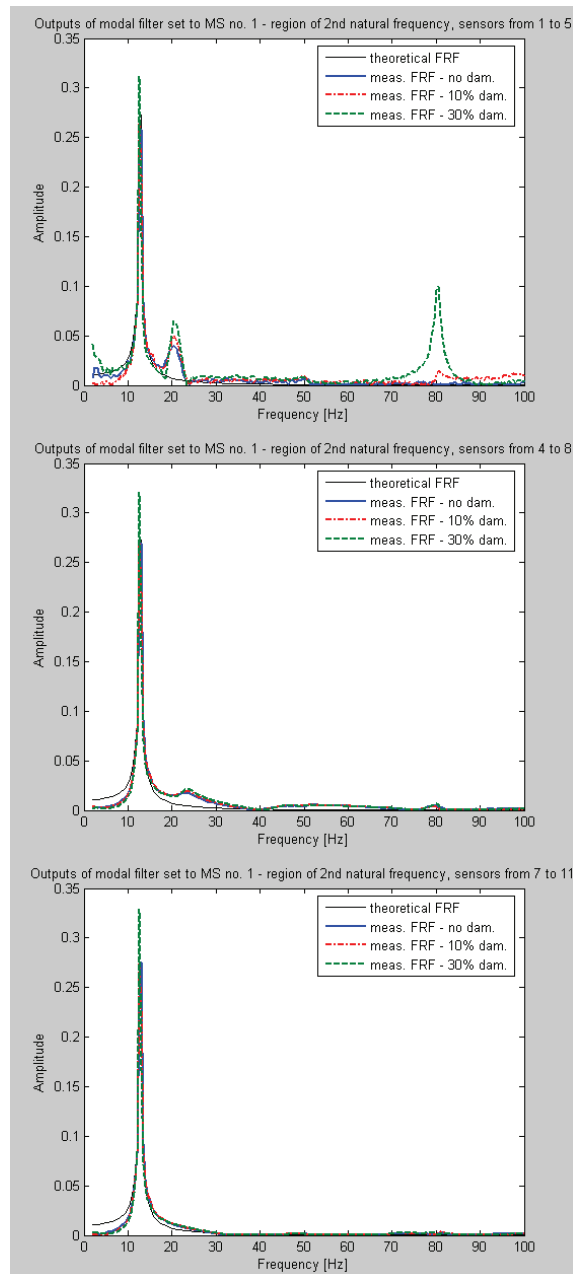
Przeprowadzono trzy testy modalne, pierwszy na belce bez uszkodzenia. Następnie wykonano nacięcie pomiędzy punktami pomiarowymi 2 i 3 o wielkości odpowiadającej 10 % i 30 % przekroju poprzecznego belki. Dla obu poziomów uszkodzenia przeprowadzono kolejne pomiary. W trakcie eksperymentów rejestrowano WFP obiektu w formie inertancji pomiędzy siłą wymuszającą, a odpowiedziami w kolejnych punktach obiektu. Dla danych zarejestrowanych dla obiektu bez uszkodzenia przeprowadzono analizę modalną i wyznaczono wzajemne wektory własne – współczynniki filtru modalnego dla danych z wszystkich czujników. Następnie filtrowano modalnie zestawy charakterystyk z kolejnych eksperymentów. Wyniki filtracji modalnej wszystkich WFP obiektu nieuszkodzonego i w kolejnych fazach uszkodzenia pokazano na rysunku 5. Ponieważ charakterystyki eksperymentalne zawierają więcej maksimum niż tylko te związane z PDW obiektu badań, w praktyce analizuje się jedynie powstawanie, czy też wzrost pików w rejonach kolejnych CzDW obiektu. Dlatego też na rysunku 5 pokazano jedynie otoczenie 4 i 5 CzDW belki. Wyniki pokazane na rysunku 5 potwierdzają wysoką czułość metody. Już 10 % uszkodzenia wyraźnie wpływa na wynik filtracji modalnej.



Rys. 5. Wyniki filtracji modalnej dla obiektu w kolejnych fazach uszkodzenia – wszystkie WFP

W kolejnym kroku podzielono belkę na 3 obszary w celu przybliżonej lokalizacji uszkodzenia. Każdy z obszarów zawierał 5 punktów pomiarowych. Z uwagi na fakt, że dysponowano jedynie 11 punktami konieczne było nakładkowanie. Dla każdej z grup punktów zbudowano filtr modalny i filtrowano nim WFP obiektu w kolejnych fazach uszkodzenia. Zakres częstotliwości dla filtrowanych WFP ograniczono do 100 Hz, czyli tak aby zawierały tylko dwie pierwsze CzDW belki. Wyniki przeprowadzonej filtracji pokazano na rysunku 6.

Pokazane na rysunku 6 wyniki filtracji modalnej WFP dla kolejnych grup punktów pomiarowych, potwierdzają poprawność działania procedury lokalizacji miejsca uszkodzenia. Dla grupy punktów zawierających uszkodzenie (zlokalizowane pomiędzy punktami 2 i 3) wyraźnie widać niedoskonałość filtracji modalnej już dla 10 % uszkodzenia – pojawienie się piku na charakterystyce w okolicy 80 Hz – druga CzDW belki (górny rysunek). Natomiast dla grup punktów nie zawierających uszkodzenia pik ten w zasadzie się nie pojawia.



Rys. 6. Wyniki filtracji modalnej dla obiektu w kolejnych fazach uszkodzenia – kolejne grupy WFP

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Zaproponowana metoda lokalizacji uszkodzeń poprzez filtrację modalną została dwukrotnie zweryfikowana najpierw przy pomocy danych symulacyjnych, a następnie z zastosowaniem danych eksperymentalnych. Obie próby zostały zakończone powodzeniem. Symulowane uszkodzenie zostało wykryte i zlokalizowane z dokładnością do kilku punktów pomiarowych. W dalszych pracach należałoby się zastanowić jak skutecznie wykorzystać wysokość względną fałszywych pików do bardziej dokładnego wykrywania i lokalizacji uszkodzeń.

PODZIĘKOWANIE

Praca została wykonana w ramach Projektu Badawczego Rozwojowego R0301502 „System monitorowania i diagnostyki konstrukcji o wysokim poziomie ryzyka awarii” i sfinansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

LITERATURA

- [1] Mendrok K., Uhl T.: *Application of modal filter for damage detection*. Proceedings of III ECCOMAS Thematic Conference on smart structures and materials, Gdansk, Poland, 2007.
- [2] Deraemaeker A., Preumont A.: *Vibration based damage detection using large array sensors and spatial filters*, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 20, Issue 7, 1615-1630. 2006.
- [3] Meirovitch L., Baruh H.: *Control of self-adjoint distributed parameter system*, Journal of Guidance Control and Dynamics, 8 (6), 60-66., 1982.
- [4] Zhang Q., Allemang, R. J., Brown, D. L.: *Modal Filter: Concept and Applications*, Proceedings of International Modal Analysis Conference, pp. 487-496., 1990.
- [5] Mendrok K., Uhl T.: *Overview of modal model based damage detection methods*, Proceedings of 2004 ISMA, Leuven, Belgium., 2004.
- [6] Uhl T.: *Komputerowo wspomaganą identyfikacją modeli konstrukcji mechanicznych*, WNT, Warszawa, 1997.
- [7] Lisowski W.: *Wybrane problemy automatyzacji eksperymentalnej analizy modalnej*, Wydawnictwa AGH, Kraków, 2006.

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

