

WYKRYWANIE USZKODZEŃ KONSTRUKCJI NA PODSTAWIE ANALIZY ZMIAN PARAMETRÓW MODALNYCH

Olga Własów

I stopień, 6 semestr, Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
e-mail: wlasowo@gmail.com

Promotor: *dr hab. inż.* Magdalena Rucka

wykrywanie uszkodzeń, analiza modalna, częstotliwość drgań

1 WSTĘP

Obiekty inżynierskie o wysokim stopniu skomplikowania często poddawane są diagnostyce stanu konstrukcji w celu zapewnienia najwyższego stopnia bezpieczeństwa użytkownikom. Nowoczesne systemy monitoringu opierają się na metodach bazujących na zmianie właściwości dynamicznych. [5] Do konstrukcji szczególnie podatnych na oddziaływania dynamiczne należą mosty, stadiony czy tunele. Jednym z wykorzystywanych sposobów poszukiwania uszkodzeń i badania właściwości dynamicznych różnorodnych obiektów jest analiza modalna.

Analiza modalna wykorzystuje model modalny składający się ze zbioru częstości własnych, postaci drgań oraz współczynników tłumienia. [3] Na podstawie tych parametrów można przewidzieć jak zachowa się obiekt, gdy zostanie zaburzona jego równowaga. Przewidywania mogą bezpośrednio wpłynąć na modyfikację konstrukcji zapewniając bezpieczną eksploatację.

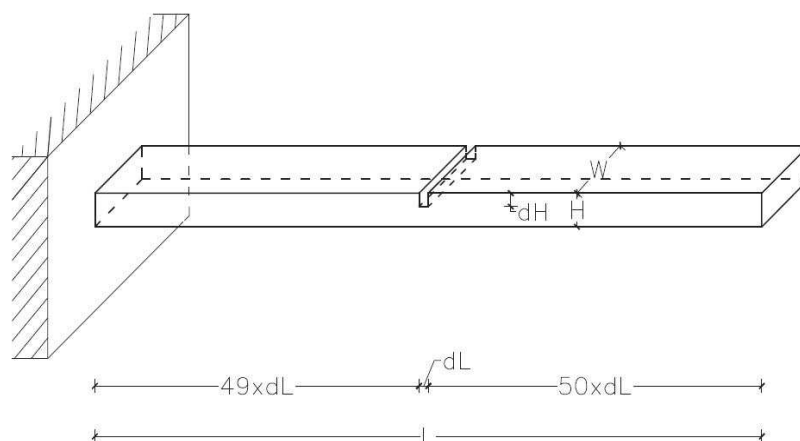
Istnieją trzy rodzaje analizy modalnej: eksperymentalna, eksploatacyjna oraz teoretyczna. [6] Dwie pierwsze bazują na rejestracji sygnałów pomiarowych, przetworzeniu ich oraz obróbce uzyskanych wyników. W analizie eksperymentalnej sygnały pomiarowe uzyskiwane są dzięki kontrolowanemu zadaniu siły wymuszającej, np. impuls wywołany za pomocą młotka modalnego. [2] Analiza eksploatacyjna wykorzystuje występujące obciążenie eksploatacyjne, mierzona jest jedynie odpowiedź konstrukcji. Natomiast, analiza teoretyczna opiera się na rozwiązaniu zagadnienia własnego dla przyjętego modelu obliczeniowego. Wszelkie zmiany sztywności czy masy modelowanego elementu mają swoje odzwierciedlenie w charakterystykach dynamicznych.

Artykuł ma na celu przeprowadzenie dwuetapowej identyfikacji uszkodzeń z wykorzystaniem teoretycznej analizy modalnej. W pierwszym etapie analizowano wpływ wielkości uszkodzenia na przesunięcie wartości częstotliwości drgań własnych. Drugi etap polegał na wykryciu położenia uszkodzenia na podstawie wyznaczenia postaci oraz krzywizny drgań.

2 OPIS MODELU

Analizowana belka z rysą poprzeczną utwierdzona jest na swoim lewym końcu, prawy jest zwolniony (Rysunek 1). Belka ma wymiary 1000 x 50 x 100 mm, a rysa o długości $L=10$ mm i wysokości dH zmieniającej się, co 10 mm, w przedziale $\langle 0; 30 \rangle$ zlokalizowana jest w odległości $49 \times dL=490$ mm od utwierdzonego końca.

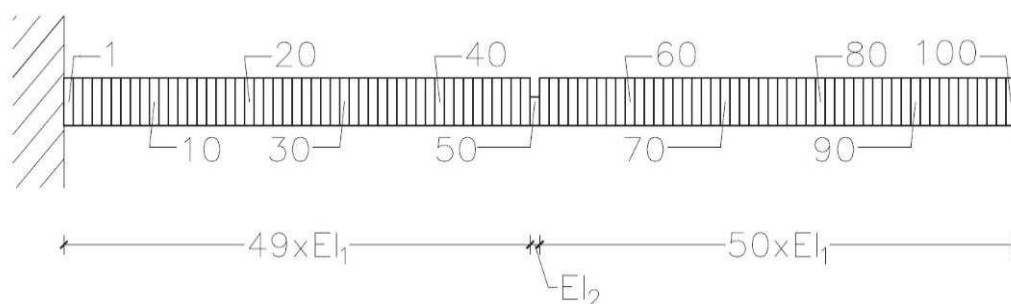
W obliczeniach przyjęto parametry materiałowe jak dla aluminium: moduł sprężystości $E=69$ GPa oraz gęstość $\rho=2720$ kg/m³.



Rysunek 1: Geometria modelowanego elementu.

3 MODEL NUMERYCZNY

Belka została wymodelowana za pomocą metody elementów skończonych w programie MATLAB®. Założono podział na 100 elementów belkowych (Rysunek 2) o dwóch stopniach swobody w każdym węźle. Ze względu na gęsto ułożone elementy na rysunku zaznaczono jedynie co dziesiąty. Element umiejscowiony w odległości 490 mm od podpory z uwagi na występujące w nim uszkodzenie posiada mniejszą sztywność w stosunku do pozostałych. [1]



Rysunek 2: Schemat modelu numerycznego (numeracja co 10ego elementu)

4 ANALIZA WYNIKÓW

4.1 Badanie częstotliwości własnych

Na drodze obliczeń uzyskano wartości częstości drgań własnych. Na podstawie wyznaczonych wartości częstości obliczono częstości. Wyniki zaprezentowane poniżej zostały wyznaczone dla czterech wariantów: belki nieuszkodzonej oraz dla belki o trzech różnych wielkościach rysy: 10, 20 i 30 mm (Tabela 1).

częstotliwość [Hz]	brak rysy	10mm	20mm	30mm
f_1	15,814	15,772	15,678	15,285
f_2	99,103	98,165	95,703	87,648
f_3	277,493	277,491	277,487	277,469

Tabela 12: Częstości własne wspornika nieuszkodzonego oraz dla głębokości uszkodzenia 10, 20 i 30 mm

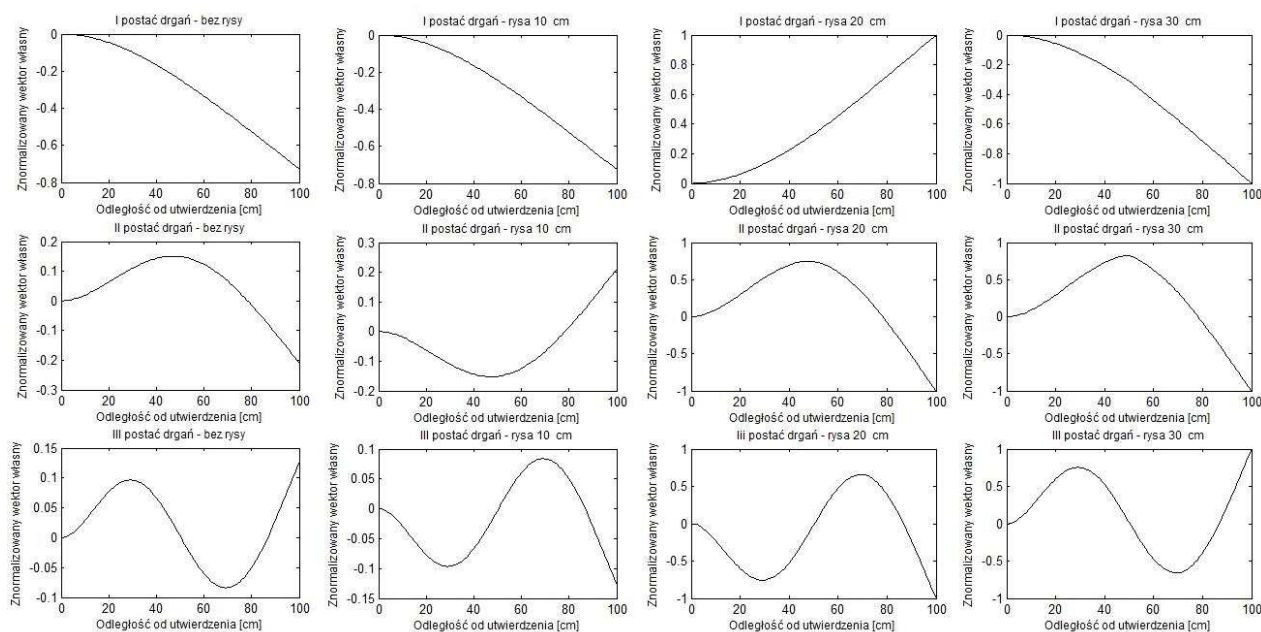
częstotliwość	10mm	20mm	30mm
f_1	0,227%	0,857%	3,340%
f_2	0,947%	3,432%	11,559%
f_3	0,001%	0,002%	0,009%

Tabela 2: Procentowe zmiany wartości częstości własnych względem wspornika nieuszkodzonego dla głębokości uszkodzenia 10, 20, 30 mm

Belka wspornikowa jest konstrukcją ciągłą, stąd posiada nieograniczoną liczbę postaci drgań własnych, a tym samym częstości. Na potrzeby analizy ograniczono się do trzech pierwszych postaci. Analizując uzyskane wyniki można stwierdzić, że częstości maleją wraz ze wzrostem uszkodzenia i zmieniają się proporcjonalnie do wielkości uszkodzenia. Nie jest to jednak zależność liniowa. Zmiany częstości drgań własnych wspornika są również zależne od badanej postaci drgań. Różnice wahają się w granicach 0,001-11,559% (Tabela 2). Uszkodzenie sięgające ponad połowę przekroju dla drugiej postaci drgań wywołuje największą zmianę wartości częstości, aż o 11,56% w stosunku do przekroju niezarysowanego. W trzeciej postaci drgań częstości wykazują minimalne zmiany, zauważalne dopiero przy dużej dokładności obliczeń. Tak małe wartości zmian częstości w trzeciej postaci drgań najpewniej są spowodowane wyglądem III postaci drgań. Dla badanego wspornika uszkodzenie znajduje się w odległości 490 mm od utwierdzenia, a wartość znormalizowanego wektora własnego w tym miejscu dla wszystkich wysokości zarysowania jest bliska zeru (por. Rysunek 4).

Podsumowując, na podstawie analizy wartości częstości drgań można skonstatować czy wspornik jest uszkodzony czy nie, ale nie da się bezpośrednio określić miejsca występowania uszkodzenia. Jednak, ze względu na proporcjonalną zmianę wielkości częstości dla kolejnych głębokości nacięcia można stwierdzić, że dokładna lokalizacja defektu byłaby możliwa przy analizie wyników dla innego umiejscowienia elementu belkowego o zmniejszonej sztywności.

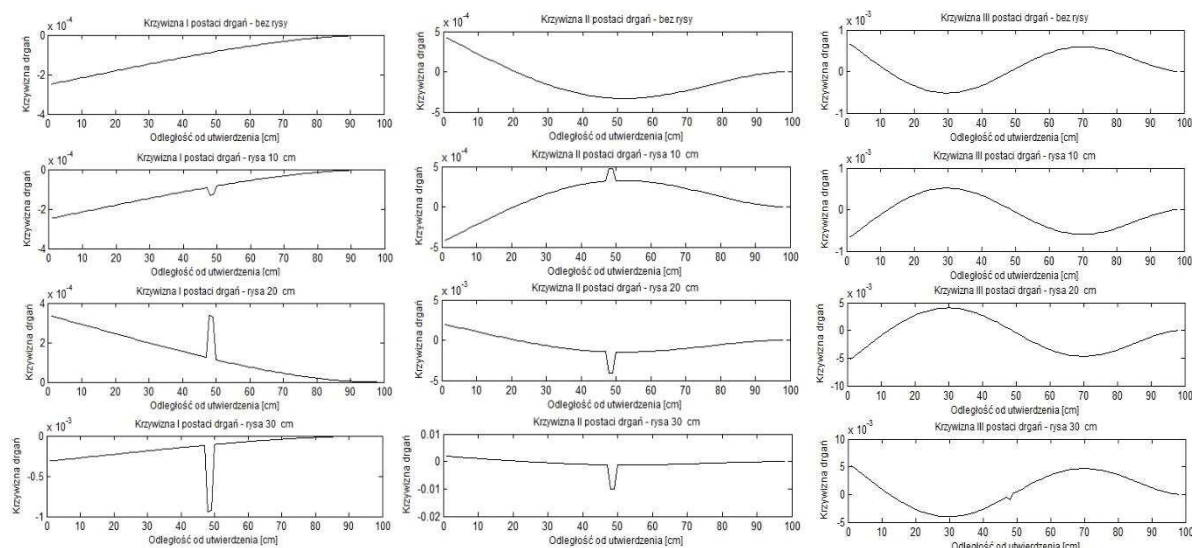
4.2 Badanie postaci drgań i ich krzywizn



Rysunek 3: Postacie drgań własnych belki nieuszkodzonej oraz z uszkodzeniem o głębokości 10 mm, 20 mm oraz 30 mm.

Postacie drgań własnych różnią w się w bardzo małym stopniu, co widać na rysunku 4, podobnie jak częstości drgań. Jedyna widoczna różnica na wykresach występuje przy drugiej postaci drgań, gdzie można zaobserwować drobne wahanie wykresu postaci drgań w jego najwyższym punkcie dla belki z rysą głębokości 30 mm w porównaniu do belki nieuszkodzonej. Wraz ze wzrostem postaci można zaobserwować postępującą zmianę wartości wektorów własnych, która sygnalizuje obecność uszkodzenia w elemencie. Tym razem, nawet analiza większej ilości postaci dla różnego umiejscowienia uszkodzenia byłaby nieskuteczna, ponieważ różnice w wykresach rosną wraz z numerem postaci, ale nie pojawiają się w jednym punkcie. Zmieniają one wartości wektorów własnych dla całej długości badanego wspornika a nie konkretnego miejsca. Stąd, pomimo wyraźnych przesłanek wskazujących na istnienie uszkodzenia w belce, określenie dokładnego miejsca występowania uszkodzenia nie jest możliwe na podstawie pozyskanych informacji.

Do lokalizacji uszkodzenia niezbędne jest wyznaczenie krzywizny poszczególnych postaci drgań. Krzywizna drgań została wyznaczona, jako druga pochodna wektora własnego. [4]



Rysunek 4: Krzywizny drgań dla trzech kolejnych postaci drgań belki w czterech wariantach: nieuszkodzonej oraz z uszkodzeniem o głębokości 10 mm, 20 mm, 30 mm.

Dzięki wysokiej wrażliwości na lokalną zmianę sztywności krzywizna pozwala zlokalizować miejsce uszkodzenia. Rysunek 5 pokazuje, że dla pierwszych dwóch postaci drgań można z łatwością wskazać miejsce występowania rysy, które na wykresie charakteryzuje się pikiem krzywizny. Krzywizny pierwszych dwóch postaci obrazują wyraźne zaburzenia wykresu uszkodzonych elementów w obszarze oddalonym o 49 cm od utwierdzenia wpornika. Przy trzeciej postaci drgań jedynie wykres wyznaczony dla najgłębszej rysy obrazuje miejsce jej występowania. Zdecydowanie widać wyższą przydatność i skuteczność analizy krzywizny nad analizą postaci drgań.

5 PODSUMOWANIE

Zastosowanie analizy modalnej dla modelu numerycznego podzielonego na sto elementów belkowych pozwoliło na szczegółową analizę parametrów dynamicznych belki. Rzeczywiste uszkodzenie wspornika zostało zastąpione elementem o zmniejszonej sztywności. Zestawiono ze sobą wyniki badania wartości częstotliwości drgań dla różnych postaci, a także samych postaci oraz ich krzywizn.

Częstotliwości drgań własnych modelu malały wraz ze wzrostem głębokości uszkodzenia, ale nie pozwalały na dokładną lokalizację uszkodzenia. Postaci drgań ponownie pozwoliły na stwierdzenie pojawienia się uszkodzenia bez wskazywania konkretnej lokalizacji. Lokalizacja uszkodzenia poprzez analizę częstotliwości oraz postaci stałaby się możliwa przy analizie wyników przy wymodelowaniu różnych położeń rysy. Najskuteczniejszą metodą bezpośredniego określenia miejsca występowania uszkodzenia okazał się sposób wykorzystujący porównanie wykresów krzywizn drgań. W wykresach uzyskanych na drodze podwójnego różniczkowania wektora własnego w miejscu występowania rysy pojawiało się zaburzenie jasno lokalizujące zarysowanie.

Przeprowadzona analiza parametrów modalnych okazała się wystarczająca do wykrycia uszkodzenia modelu obliczeniowego. Świadczy to o wysokiej użyteczności metody. Wadą metody jest to, iż wymaga ona dokładnych informacji dotyczących parametrów konstrukcji. Ostatecznie, w celu weryfikacji uzyskanych wyników, wykonana analiza powinna zostać zestawiona z badaniami rzeczywistego wspornika.

LITERATURA

- [1] Cornwell P., Doebbling S. W., Farrar C. R., Application of the strain energy damage detection method to plate-like structures, *Journal of Sound and Vibration*, 1999.
- [2] Mendrok K., Kurowski P., Operational model filter and its applications, *Archives of Applied Mechanics*, p. 509-519, vol. 83, 2013.
- [3] Rucka, M., Wilde, K., *Dynamika Budowli z przykładami w środowisku MATLAB®*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2014.
- [4] Rucka M., Wilde K., Lokalizacja uszkodzeń konstrukcji belkowych za pomocą badań dynamicznych I analizy falkowej, *Inżynieria i Budownictwo*, 6/2005.
- [5] Wang X., Hu N., Fukunga Hisao, Yao Z.H., Structural damage identification using static test data and changes in frequencies, *Engineering Structures* 23, 2001.
- [6] Żółtowski M., Operacyjna analiza modalna w badaniu konstrukcji budowlanych, *Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy*, s. 137-147, 2012.