

ZASTOSOWANIE TECHNIK EKSPERYMENTALNEJ ANALIZY MODALNEJ W OCENIE STANU DYNAMICZNEGO

Wojciech LISOWSKI

Katedra Robotyki i Dynamiki Maszyn, Akademia Górniczo-Hutnicza
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, faks (12) 634 3505, lisowski@uci.agh.edu.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono propozycję metodyki kompleksowej oceny drgań obiektów mechanicznych opartą na wynikach wielokanałowej rejestracji przebiegów czasowych parametrów drgań w czasie pracy ustalonej dla wymuszeń eksploatacyjnych. Analiza wyników badań prowadzi do określenia przestrzennego i częstotliwościowego rozkładu amplitud drgań oraz form drgań odpowiadających drganiom strukturalnym lub składnikom harmonicznym wymuszeń. Dodatkowo, opcjonalne eksperymenty obejmują: pomiary przebiegów parametrów drgań w stanach nieustalonych i/lub klasyczny eksperyment modalny. Wyniki analizy mogą być zastosowane w: diagnostycznej ocenie jakości konstrukcji i montażu czy lokalizacji uszkodzeń, ocenie wpływu własności strukturalnych obiektu na poziom amplitudy drgań czy analizie kierunków modyfikacji strukturalnych mających na celu polepszenie stanu dynamicznego obiektu.

Słowa kluczowe: diagnostyka na podstawie modelu, eksperymentalna analiza modalna

APPLICATION OF EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS TO SYSTEM CONDITION ASSESSMENT

Summary

The paper deals with comprehensive assessment of vibration condition of mechanical systems basing on multi-channel measurement during stationary operation. In the result of the proposed analysis the spatial and spectral distribution of vibration amplitude is determined as well as vibration modes corresponding to both the structural and excited harmonic vibration components. Additionally, the analysis might be enhanced with optional experiments comprising vibration measurement during transient operation and/or classical modal experiment. The results might be applied to design and assembly quality assessment or damage localisation, to assessment of influence of structural properties on vibration amplitude and to analysis of structural modification aiming at decreasing the vibration amplitude during operation.

Keywords: Model-based Diagnostics, Experimental Modal Analysis

1. WPROWADZENIE

Diagnostyka obiektów technicznych [3], której istotą jest określanie stanu technicznego obiektów oraz śledzeniem ewolucji tego stanu stanowi zarówno dynamicznie rozwijającą się dyscyplinę badań naukowych jak i rozpowszechnioną w przemyśle metodę eksploatacji obiektów technicznych. Tradycyjnie i najszerzej stosowane podejście diagnostyczne polega na ocenie stanu obiektu opartej o analizę ewolucji symptomów tego stanu (diagnostyka symptomowa). Rozszerzenie opisu ewolucji stanu o śledzenie własności modeli dynamicznych obiektu diagnostyki, będących niezbędnym składnikiem tzw. diagnostycznego modelu holistycznego [2, 3], pozwala prowadzić ocenę stanu na podstawie modelu. Diagnostyka na podstawie modelu ułatwia: genezę i detekcję uszkodzeń. Zastosowanie modelu jest praktycznie niezbędne do lokalizacji uszkodzeń. Charakter pracy

większości obiektów mechanicznych, których elementy przemieszczają się względem siebie, powoduje powstawanie zmiennych w czasie obciążeń mechanicznych rozumianych jako siły i momenty sił. W odpowiedzi na działające zmienne obciążenia powstają drgania obiektów mechanicznych. W większości wypadków, ze względu na obrotowy ruch elementów obiektów mechanicznych, obciążenia mają charakter cykliczny w czasie. Powoduje to szerokie zastosowanie dla celów diagnostycznych technik pomiaru parametrów drgań układów mechanicznych oraz ich analizy opartej na założeniach stacjonarności przebiegów czasowych tych parametrów. Diagnostyka symptomowa jest często prowadzona na podstawie oceny poziomu amplitudy parametrów drgań obiektów mechanicznych [6]. Standardowo jednak, monitorowanie parametrów drgań przeprowadza się w małej sieci punktów pomiarowych, a ocenę stanu dynamicznego jedynie

na podstawie wskazań pojedynczych czujników (ocena „skalarna”).

W stosowanym w diagnostyce modelu holistycznym obiektów mechanicznych zawarte są wartości parametrów strukturalnych (masa, współczynniki tłumienia, współczynniki sprężystości) oraz ich przestrzenny rozkład [2]. Jedną z technik analizy rozkładu wartości parametrów strukturalnych jest eksperymentalna analiza modalna [4]. W praktyce przemysłowej występuje kilka czynników sprzyjających wykorzystaniu analizy modalnej w diagnostyce opartej na modelu.

Po pierwsze, występuje zapotrzebowanie na badania własności strukturalnych w związku z:

- powstawaniem podwyższonego poziomu drgań
- powstawaniem uszkodzeń
- planowanymi modyfikacjami konstrukcji.

Dodatkowo coraz szerzej wykorzystuje się:

- technikę równoczesnego, wielokanałowego pomiaru przebiegów czasowych parametrów drgań oraz ich charakterystyk widmowych
- algorytmy analizy modalnej dla danych zmierzonych przy: wymuszeniu sterowanym i mierzonym (klasyczna Eksperymentalna Analiza Modalna) [4], jak i w czasie pracy – przy wymuszeniu eksploatacyjnym, nie wymagające pomiaru przebiegu wymuszenia (Eksploatacyjna Analiza Modalna) [5].

Problem umiejscowienia analizy modalnej w algorytmie procedury diagnostycznej opartej na modelu dla maszyn wirnikowych opisano w pracy [1].

2. PROPONOWANA METODYKA ZASTOSOWANIA TECHNIK ANALIZY MODALNEJ W OCENIE STANU DYNAMICZNEGO

Zaproponowana w pracy metodyka zastosowania technik analizy modalnej do oceny stanu dynamicznego może być wykorzystana w przypadku diagnostyki stanu maszyny wraz konstrukcjami wsporczymi i/lub fundamentami oraz środków transportu. Proponowana metodyka oceny stanu ma na celu:

- uzupełnienie symptomowej klasyfikacji stanu dynamicznego
- określenie wpływu własności strukturalnych na poziom drgań.

Etap analizy stanu dynamicznego obejmuje:

- wskazanie obszarów występowania największych amplitud drgań dla pasma częstotliwości analizy oraz dla wybranych wartości częstotliwości
- wskazanie wartości częstotliwości, w których występują największe wartości amplitud prędkości drgań.

Etap określenia wpływu własności strukturalnych na amplitudy drgań obejmuje analizę zgodności obszarów i pasm wartości częstotliwości występowania maksymalnych amplitud parametrów

drgań z formami (postaciami) drgań i wartościami częstotliwości drgań strukturalnych wzbudzanych w czasie pracy ustalonej.

Wyniki analizy stanu dynamicznego i wpływu własności strukturalnych na amplitudy drgań mogą być wykorzystane do:

- oceny jakości konstrukcji [1]
- oceny jakości montażu [1]
- analizy kierunków modyfikacji strukturalnych mających na celu polepszenie stanu dynamicznego.

Podstawą obu rozważanych etapów są wyniki eksperymentu modalnego:

- prowadzonego w obecności (zwykle niemierzalnych) wymuszeń eksploatacyjnych w czasie pracy
- przy zastosowaniu sterowanych i mierzonych wymuszeń po zatrzymaniu pracy.

Eksperyment prowadzony w warunkach eksploatacji obejmuje: wielokanałowy równoczesny pomiar przyspieszenia drgań w sieci punktów pomiarowych rozłożonych na całej badanej konstrukcji w czasie pracy ustalonej lub dodatkowo w czasie stanów przejściowych.

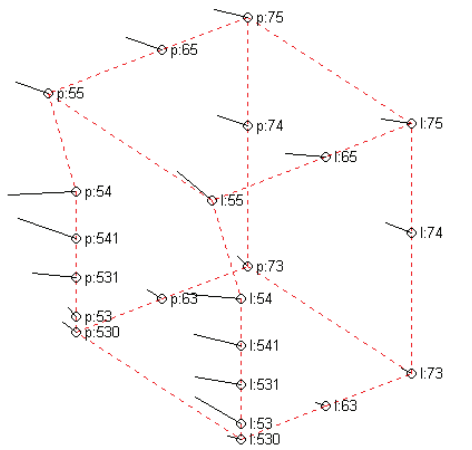
Eksperyment prowadzony przy zastosowaniu sterowanych i mierzonych wymuszeń po zatrzymaniu pracy obejmuje wielokanałowy równoczesny pomiar charakterystyk widmowych parametrów drgań.

3. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA \SFORMUŁOWANEJ METODYKI

Podstawą prowadzonych analiz jest rejestracja czasowych przebiegów przyspieszeń drgań w czasie pracy ustalonej. Długość czasu rejestracji przebiegów czasowych parametrów drgań musi umożliwić wystarczająco dobre dla prowadzenia analizy odwzorowanie się drgań strukturalnych w rejestrowanych przebiegach pomiarowych i wynosi zwykle od 90 s do 300 s. Zalecana jest rejestracja przebiegów czasowych, ponieważ estymacja widm na podstawie estymat czasowych (funkcja korelacji) sygnału zwykle jest znacznie bardziej efektywna niż klasyczna estymacja z uśrednianiem w dziedzinie częstotliwości. Na podstawie wyników pomiaru wyznaczone są:

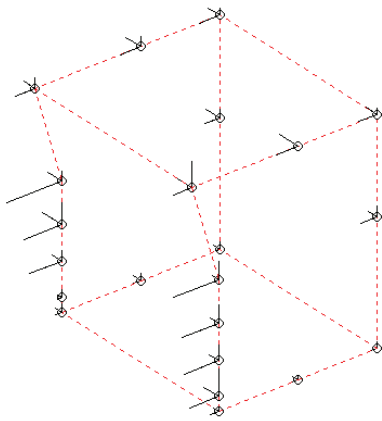
- uśredniony w czasie rozkład wartości skutecznej amplitudy prędkości drgań w punktach pomiarowych
- uśrednione w sieci punktów pomiarowych widmo prędkości drgań
- formy drgań (tzw. eksploatacyjne postacie drgań) dla częstotliwości odpowiadających maksimum lokalnym amplitudy przebiegu uśrednionego widma prędkości drgań, wyznaczone metodą eksploatacyjnej analizy modalnej.

Dla przykładu ramy konstrukcji wsporczej maszyny na rys. 1 pokazano rozkład przestrzenny amplitud prędkości drgań w wybranym paśmie częstotliwości.



Rys. 1. Przestrzenny rozkład wartości skutecznej amplitudy prędkości drgań

Rozważany rozkład często łatwiej analizować przy rozłożeniu amplitud prędkości drgań na trzy prostopadłe kierunki (rys. 2).

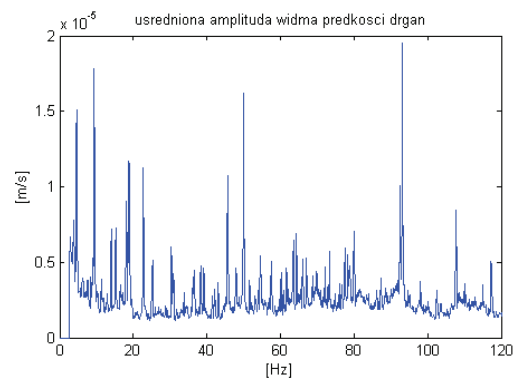


Rys. 2. Przestrzenny rozkład wartości skutecznej amplitudy prędkości drgań

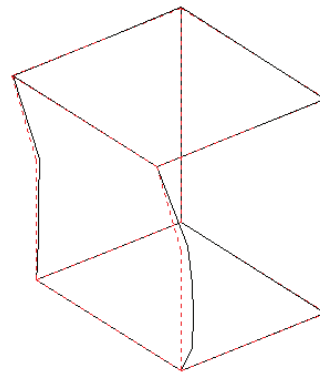
Na rysunkach 1 i 2 zwraca uwagę znaczna amplituda drgań dwóch słupów (punkty od 530 do 54) ramy.

Na rys. 3 przedstawiono rozkład częstotliwościowy amplitud drgań uśredniony dla wszystkich punktów i kierunków pomiarowych. Duże amplitudy odpowiadają wielu składnikom harmonicznym od 4.62 Hz do 93.12 Hz.

Dla składnika harmonicznego wymuszeń o częstotliwości 93.12 Hz zidentyfikowano metodą eksploatacyjnej analizy modalnej postać drgań pokazaną na rys. 4. W postaci tej (92.82 Hz) dominują drgania jednego ze słupów. Wyznaczenie eksploatacyjnej postaci drgań pozwoliło powiązać ze sobą przestrzenny i częstotliwościowy rozkład amplitudy drgań.



Rys. 3. Częstotliwościowy rozkład wartości skutecznej amplitudy prędkości drgań

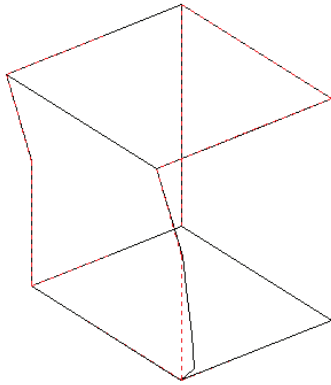


Rys. 4. Eksploatacyjna postać drgań 92.82 Hz

Wskazany przez rozkład przestrzenny amplitudy drgań obszar konstrukcji (słup) o dużej amplitudzie drga w czasie pracy z częstotliwością jednego z dominujących składników harmonicznym wymuszenia wskazanych przez częstotliwościowy rozkład amplitudy drgań. Weryfikacja wpływu własności strukturalnych wskazanego słupa na amplitudę drgań w częstotliwości rozważanego składnika harmonicznego wymuszenia wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań modalnych po zatrzymaniu pracy maszyny. Najczęściej, ze względów ekonomicznych, przeprowadza się w takim wypadku badania modalne z zastosowaniem wymuszenia impulsowego [4], obejmujące rejestrację przebiegów widmowych funkcji przejścia między impulsową siłą wymuszającą a sygnałami odpowiedzi na wymuszenie w czasie postoju maszyny, na podstawie których:

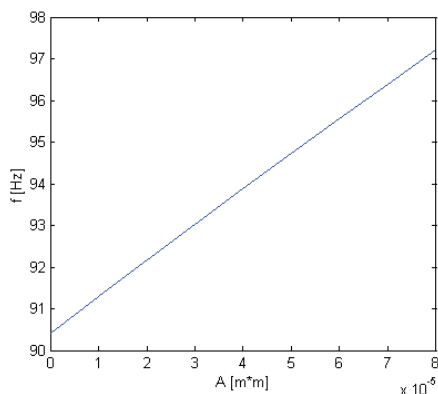
- wyznaczany jest model modalny wraz z postaciami drgań
- przeprowadzana jest analiza wpływu przykładowych modyfikacji strukturalnych konstrukcji na zmiany jej wybranych wartości częstotliwości własnych i postaci drgań.

Na rys. 5 pokazano zidentyfikowaną na podstawie wyników testu impulsowego postać drgań dla wartości częstotliwości 90.42 Hz. W postaci tej dominują drgania rozważanego słupa, co potwierdziło wpływ własności strukturalnych rozważanej ramy na poziom amplitud drgań rozważanej maszyny.



Rys. 5. Postać drgań własnych 90.42Hz

W uzupełnieniu przeprowadzono przykładową symulację usztywnienia słupów prętowym wspornikiem stalowym zamocowanym przegubowo w punktach l:531 i p:531 (por. rys. 1). Wynik symulacji obrazuje wykres (rys. 6) zależności wartości częstotliwości drgań własnych postaci 90.42 Hz od wielkości powierzchni kołowego przekroju poprzecznego A dodanego wspornika.



Rys. 7. Wyniki symulacji modyfikacji strukturalnej

Wyniki przeprowadzonej symulacji modyfikacji strukturalnej pokazały znaczne możliwości modyfikacji sztywności dynamicznej ramy maszyny w zakresie częstotliwości rozważanego składnika harmonicznego wymuszenia.

W przypadku, gdy badania modalne przy wymuszeniu impulsowym nie mogą być wykonane (np. dla dużych obiektów), często przeprowadza się rejestrację czasowych przebiegów przyspieszeń drgań w stanach nieustalonych (np.: rozbieg i/lub wybieg), na podstawie których wyznaczane są:

- szacunkowe wartości częstotliwości drgań własnych na podstawie analizy amplitud widm dynamicznych
- lokalne estymaty postaci drgań przy pomocy algorytmów eksploatacyjnej analizy modalnej.

Ze względu na specyfikę eksploatacji rozważanej maszyny badania takie nie zostały wykonane.

4. PODSUMOWANIE

Dzięki wykorzystaniu oszacowania rozkładu drgań przedstawiona metodyka oceny stanu dynamicznego ma formę oceny „wektorowej”, w przeciwieństwie do oceny „skalarnej”, stosowanej w klasycznej diagnostyce symptomowej. Pozwala to przyporządkowywać maksimum lokalnym amplitudy drgań zarówno obszary konstrukcji jak i zakresy częstotliwości. Takie przyporządkowanie stanowi ważną informację dla konstruktora maszyny (lokalizuje zakres ewentualnych modyfikacji konstrukcji) oraz dla eksploatującego maszynę (precyzuje zakres obserwacji stanu dynamicznego maszyny).

Analiza ewolucji rozkładu drgań oraz postaci drgań może być podstawą sformułowania procedury diagnostycznej opartej na modelu.

LITERATURA

- [1]. Lisowski W., Uhl T., Application of modal analysis to diagnostics of complex systems, *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*, Z.4.Vol.36, str.181-195, 2001
- [2]. Natke H.G., Cempel C., *Model-Aided Diagnosis of Mechanical Systems*, Springer, 1997
- [3]. Niziński S., Michalski R., *Diagnostyka obiektów technicznych*, Wydawnictwo ITE Radom, 2002
- [4]. Uhl T., *Komputerowo wspomaganą identyfikacją modeli konstrukcji mechanicznych*, WNT 1997
- [5]. Uhl T., Lisowski W., Kurowski P., *In-operation modal analysis and its applications*, Wydawnictwo KRiDM AGH, Kraków, 2001
- [6]. PN-ISO 10816 Ocena drgań maszyny na podstawie pomiarów na częściach niewirujących



Wojciech LISOWSKI (ur. 1963).

Stopień magistra (1987) i doktora (1995) nauk technicznych uzyskał na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo Hutniczej w Krakowie.

Autor i współautor 16 artykułów dotyczących

eksperymentalnej analizy drgań konstrukcji mechanicznych.

Zainteresowania autora obejmują problemy identyfikacji modeli dynamicznych układów mechanicznych ze szczególnym uwzględnieniem zastosowania eksperymentalnej analizy modalnej. Aktualne prace realizowane przez autora dotyczą: metodyki planowania testu modalnego, wspomaganie komputerowego podejmowania decyzji w trakcie estymacji parametrów modelu modalnego oraz zastosowań analizy modalnej w warunkach przemysłowych.