

WYBRANE PROBLEMY DYNAMIKI STRUKTURALNEJ W DIAGNOSTYCE

Tadeusz UHL, Wojciech Lisowski

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Robotyki i Dynamiki Maszyn

Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tuhl@rob.wibro.agh.edu.pl

Streszczenie

Praca dotyczy problemu zastosowania modeli w diagnostyce. Określenie zależności między własnościami modelu a stanem technicznym jest podstawą do lokalizacji uszkodzeń, co zwiększa zakres formułowanej diagnozy. Autorzy zaproponowali wykorzystanie eksperymentalnego modelu modalnego do diagnozowania stanu maszyn wirnikowych. Zwiększenie efektywności wykorzystania takiego modelu autorzy chcą osiągnąć poprzez zastosowanie metody eksploatacyjnej analizy modalnej umożliwiającej identyfikację modelu modalnego bez potrzeby wyłączenia badanej maszyny z eksploatacji oraz bez potrzeby pomiaru sił działających na badaną maszynę. Omawiane problemy zilustrowano wybranymi wynikami badań pompy wodnej dużej mocy.

Słowa kluczowe: modele diagnostyczne, analiza modalna, dynamika, maszyna wirnikowa.

SELECTED PROBLEMS OF STRUCTURAL DYNAMICS IN DIAGNOSTICS

Summary

This paper deals with application of models for diagnostic purposes. The relationship between the technical state and the model properties is the base of fault (damage) localization, what enhances the scope of formulated diagnosis. The authors proposed application of experimental modal model for diagnostic of rotational machinery. In order to increase the efficiency of use of such a model the authors use Operational Modal Analysis method that allows identification of modal model for operational conditions without necessary of measurement of operational forces. Considered problems are presented on example of a high power water pump vibration testing selected results.

1. WPROWADZENIE

Diagnostyka eksploatacyjna jest metodą zwiększania dyspozycyjności maszyn poprzez: określanie aktualnego stanu technicznego, wykrywanie uszkodzeń, lokalizację uszkodzeń, określenie przyczyn uszkodzeń oraz prognozowanie ewolucji stanu. Zastosowanie diagnostyki pozwala uwzględnić aktualny stan maszyn w planowaniu produkcji i zakresu remontów oraz uwzględnienie kryteriów trwałości w sterowaniu.

Stosowane procedury diagnostyczne mogą być oparte na symptomach stanu lub na modelach obiektu.

W pierwszym przypadku realizowane jest klasyczne podejście do diagnostyki obiektów technicznych, w której podstawowym problemem jest ustalenie relacji $\text{symptom} \Leftrightarrow \text{stan}$.

Modele wykorzystywane w drugiej wymienionej grupie procedur są identyfikowane dla rzeczywistych obiektów na podstawie wyników badań eksperymentalnych. Dla celów diagnostyki mogą być wykorzystywane zarówno modele funkcjonalne jak i modele strukturalne. Szczególnie przydatne dla celów diagnostyki mogą być modele strukturalne,

które pozwalają na poszukiwanie relacji pomiędzy elementami konstrukcji a własnościami modelu. Procedura diagnostyki oparta na modelu wymaga prowadzenia na bieżąco identyfikacji parametrów wykorzystywanego modelu oraz śledzenia ich zmian na podstawie pomiarów prowadzonych w czasie eksploatacji. Określenie relacji pomiędzy parametrami modelu a elementami konstrukcji ma na celu śledzenie stanu konstrukcji oraz wykrywanie, lokalizację i ocenę zakresu uszkodzenia.

Jedną z metod umożliwiających sformułowanie modelu strukturalnego konstrukcji mechanicznej, przydatnego do zastosowania w procedurze diagnostycznej jest eksperymentalna analiza modalna [2], [4]. Jest to metoda doświadczalna stosowana w praktyce inżynierskiej w celu opisu dynamicznych własności strukturalnych układów mechanicznych, budowli czy środków transportu. Metoda ta jest oparta na szeregu ostrych założeń. W praktyce badań układów technicznych często założenia te są spełnione w ograniczonym stopniu. Mimo to, metoda ta jest szeroko stosowana, ponieważ daje możliwość efektywnego sformułowania przybliżonego opisu własności strukturalnych obiektu dla warunków przeprowadzonego eksperymentu. Istotną zaletą eksperymentalnej analizy modalnej jest brak założeń

dotyczących rozkładu przestrzennego parametrów strukturalnych rozważanego obiektu.

Eksploatacyjna analiza modalna [1], [5] stanowi nową technikę eksperymentalnej analizy modalnej pozwalającą w wielu wypadkach efektywnie wyznaczyć model modalny obiektu dla warunków jego pracy. W wyniku przeprowadzenia eksploatacyjnej analizy modalnej uzyskuje się opis form drgań:

- odpowiadających składowym harmonicznym wymuszenia,
- pobudzanych w rozważanych warunkach pracy strukturalnych postaci drgań, które odpowiadają postaciom drgań własnych badanego obiektu.

Autorzy posiadają szerokie doświadczenie w prowadzeniu badań modalnych w warunkach eksploatacji. Obejmuje ono badania śmigłowca [5], [7] oraz fundamentu turbosespołu [6] wykonane w celu implementacji i oceny jakości algorytmów eksploatacyjnej analizy modalnej oraz badania wentylatorów [8] przeprowadzone w celu oceny wpływu własności strukturalnych ich konstrukcji na ich stan dynamiczny.

2. SFORMUŁOWANIE METODYKI BADAŃ

Zastosowanie modeli w diagnostyce ma na celu zastąpienie relacji symptom \leftrightarrow stan relacją parametry modelu \leftrightarrow stan. Śledzenie zmian własności modelu w takim przypadku ma umożliwić śledzenie stanu technicznego obiektu. W związku z tym procedura diagnostyczna wymaga wielokrotnego powtarzania eksperymentu identyfikacji wykorzystywanego modelu. W przeprowadzonych rozważaniach omówiono zastosowanie modeli zbudowanych na podstawie pomiarów parametrów wibroakustycznych procesów resztkowych do opisu stanu elementów krytycznych maszyn wirnikowych. Należy podkreślić, że nie wyklucza to prowadzenia równoczesnej obserwacji innych procesów resztkowych (np. elektrycznych, cieplnych itp.) oraz zmiennych procesowych (temperatura, ciśnienie itp.) dla sformułowania diagnozy stanu rozważanej klasy obiektów.

W oparciu o zdobyte w czasie badań własności strukturalnych różnorodnych obiektów doświadczenia autorzy sformułowali schemat procedury diagnostycznej opartej o wykorzystanie modeli dynamiki strukturalnej układów mechanicznych. Schemat tej procedury przedstawiono na rysunku 1. Zasadniczy celem tej procedury jest określenie przyczyn nadmiernych drgań. Przedstawiona procedura składa się z 2 przeprowadzanych równocześnie procedur składowych mających na celu lokalizację i eliminację uszkodzeń zarówno w przypadku, gdy są one skutkiem nieodpowiednich własności strukturalnych obiektu jak i w przypadku, gdy są one wynikiem działania nadmiernych wymuszeń.

Pierwsza procedura składowa opiera się na analizie własności dynamiki strukturalnej diagnozowanego

obiektu. Zakładając, że przyczyną nadmiernych drgań rozważanego obiektu jest lokalne obniżenie sztywności dynamicznej w pewnym paśmie częstotliwości przeprowadza się analizę rozkładu przestrzennego parametrów strukturalnych (masy, tłumienia i sztywności) badanego obiektu w celu wskazania obszarów jego konstrukcji, w których zmiana tego rozkładu spowoduje obniżenie poziomu drgań. Tę procedurę składową kończy sformułowanie modyfikacji strukturalnej. Należy podkreślić, że główny problem, jaki musi być rozwiązany w rozważanym przypadku polega na znalezieniu technicznej realizacji zaproponowanej modyfikacji strukturalnej, która musi być przeprowadzona przy pomocy dostępnych materiałów, sposobów obróbki oraz montażu, jak i musi spełniać ograniczenia eksploatacyjne oraz ekonomiczne.

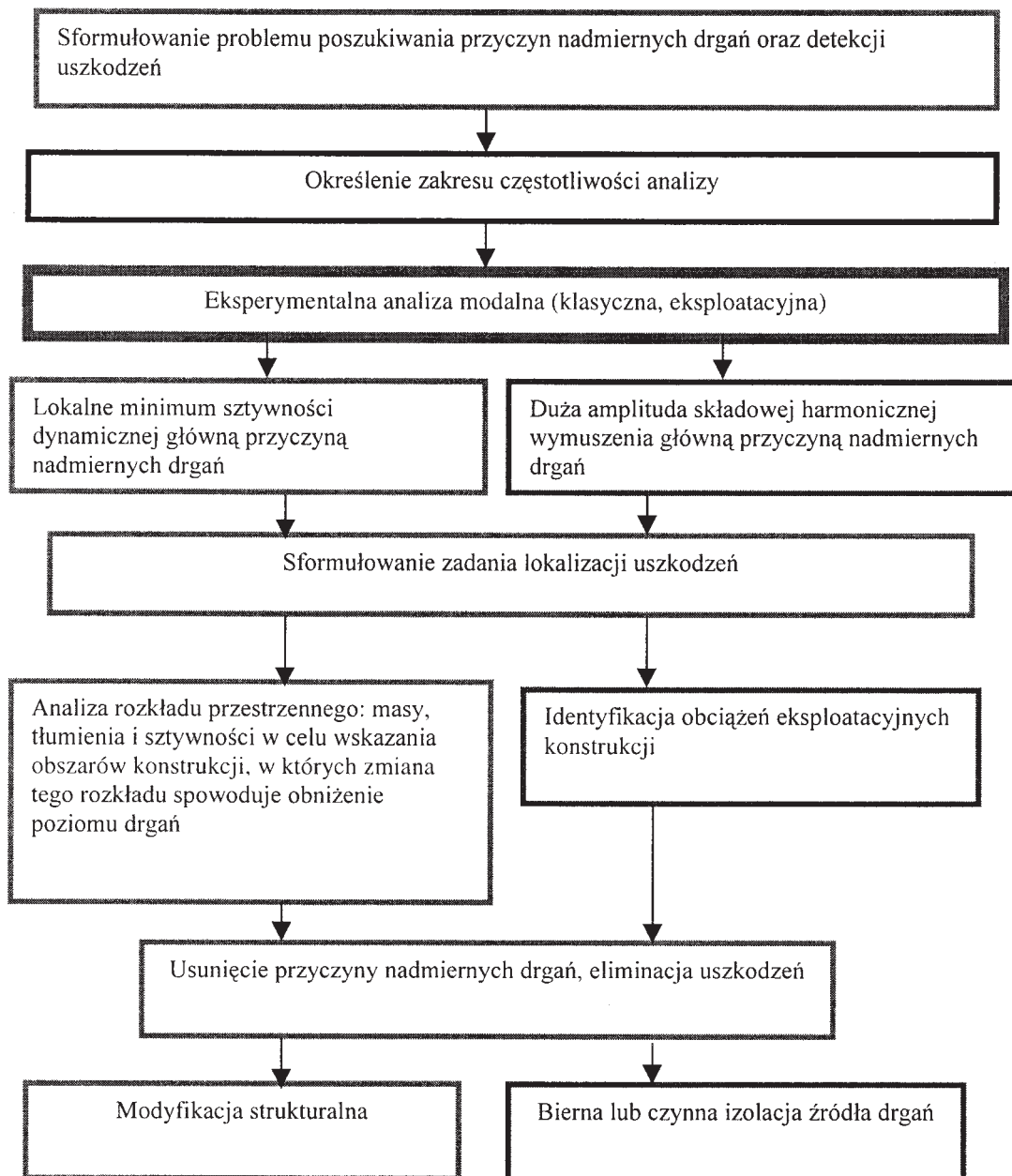
Druga procedura składowa sformułowanej procedury diagnostycznej dotyczy przypadku, w którym przyczyną drgań jest nadmierna aktywność pewnego źródła drgań znajdującego się w rozważanym obiekcie lub w jego sąsiedztwie. Realizacja tej procedury wymaga identyfikacji obciążeń eksploatacyjnych badanej konstrukcji [3]. W rezultacie procedury identyfikacyjnej wyznacza się amplitudy i przestrzenny rozkład działających w rozważanej konstrukcji sił i momentów sił oraz określa drogi rozchodzenia się energii wibroakustycznej w obiekcie. Analiza wyników przeprowadzonej identyfikacji służy opracowaniu propozycji modyfikacji własności źródła i/lub sposobu jego połączenia z rozważaną konstrukcją, które zapewniłyby obniżenie poziomu jej drgań.

Dalsze rozważania zamieszczone w niniejszej pracy dotyczą pierwszej z 2 scharakteryzowanych powyżej procedur składowych (lewa strona schematu), której ostatecznym celem jest sformułowanie modyfikacji strukturalnej konstrukcji rozważanego obiektu zapewniającej poprawę jego stanu technicznego.

Proponowany sposób wykorzystania modeli strukturalnych w procedurze diagnostycznej ma umożliwić zlokalizowanie zmian własności obiektu odwzorowanych w rozważanym modelu. Poszukiwane są zmiany własności obiektu, które stanowią przyczynę wykrytej zmiany stanu i nie wynikają jedynie ze zmiany parametrów eksploatacyjnych rozważanego obiektu.

Przeprowadzana analiza własności masowo – sprężystych (strukturalnych) badanego obiektu ma umożliwić:

- określenie wpływu własności masowo – sprężystych na poziom i rozkład przestrzenny amplitud drgań badanego obiektu,
- wskazanie obszarów badanego obiektu i zakresów częstotliwości występowania podwyższonych poziomów drgań,
- ocenę przyczyn nadmiernych drgań konstrukcji.



Rys.1. Sformułowany schemat procedury diagnostycznej

Baza danych wykorzystywana w proponowanej procedurze diagnostycznej powinna obejmować przede wszystkim 3 grupy danych:

- przebiegi amplitudy przyspieszenia drgań w czasie zwiększania i zmniejszania prędkości obrotowej wirnika rozważanej maszyny
- wyniki eksploatacyjnej analizy modalnej niewirujących części rozważanej maszyny w czasie pracy ze stałą prędkością obrotową wirnika
- wyniki dodatkowych badań modalnych wybranych części badanego obiektu po jego wyłączeniu z eksploatacji przy zastosowaniu do wymuszenia drgań młotka modalnego lub odpowiednich wzbudników.

Pomiary i archiwizacja danych koniecznych do sformułowania takiej bazy danych mogą być wykonane przez systemy monitorowania stanu maszyn

3. WYBRANE WYNIKI BADAŃ DRGAŃ POMPY WODNEJ DUŻEJ MOCY DLA CELÓW DIAGNOSTYKI

Celem relacjonowanych badań było przeprowadzenie analizy własności masowo – sprężystych (strukturalnych) badanego obiektu, składającego się z: pompy wodnej, jej napędu, przyległych odcinków rurociągów i fundamentu. Całkowita sieć punktów pomiarowych obejmowała 113 punktów rozmieszczonych na: korpusie pompy, przyległych odcinkach rurociągów, podporach pompy

i fundamencie agregatu pompowego. W każdym z punktów dokonywano pomiaru sygnału odpowiedzi w 3 wzajemnie prostopadłych kierunkach

W czasie przeprowadzonych badań wykorzystano następujące elementy aparatury pomiarowej: stacja robocza, analizator sygnałów dynamicznych, czujniki przyspieszenia, młotki modalne. Sterowanie analizatorem sygnałów dynamicznych, wstępne przetwarzanie sygnałów pomiarowych i rejestracja danych były przeprowadzone z wykorzystaniem modułowego pakietu oprogramowania LMS CADA-X.

Określono górną granicę zakresu częstotliwości sygnałów pomiarowych na 512 Hz. Taki zakres częstotliwości objął 7 harmonikę prędkości obrotowej odpowiadającą ilości łopat pojedynczego stopnia wirnika dla całego zakresu prędkości obrotowej wirnika pompy.

Pierwszy etap opisywanych badań objął sformułowanie wstępnego planu eksperymentu. Analiza konstrukcji pompy, jej napędu, posadowienia oraz układu mocowania rurociągów w najbliższym sąsiedztwie badanych pomp, umożliwiła przyporządkowanie większości głównych dominujących składników widm mierzonych parametrów drgań przyczyn wynikających z ruchu wirnika oraz charakteru pracy pompy i jej napędu oraz wskazanie rozmieszczenia punktów pomiarowych.

Wstępny plan eksperymentu został zweryfikowany i odpowiednio zmodyfikowany na podstawie wyników analizy przebiegów amplitudy przyspieszenia drgań w czasie zwiększania i zmniejszania prędkości przez wirnik pompy. W szczególności została przyjęta wartość prędkości obrotowej wirnika pompy, dla której została przeprowadzona rejestracja przebiegów przyspieszeń drgań w czasie ustalonej jej pracy. Przeprowadzony eksperyment polegał na wielokanałowej rejestracji przebiegów czasowych przyspieszeń drgań w czasie nieustalonej pracy pompy (rozbieg, wybieg). W wyniku tego eksperymentu można było ocenić wzajemne różnice wartości amplitud przyspieszeń drgań między wybranymi obszarami konstrukcji oraz określić zakresy częstotliwości dominujących amplitud drgań.

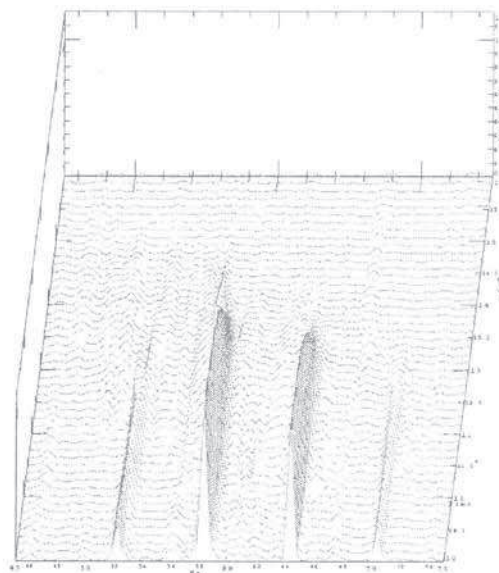
Zasadniczy etap eksperymentu objął analizę wyników pomiaru przebiegów przyspieszeń drgań pompy wraz z wybranymi obszarami rurociągu, napędu i fundamentu w czasie pracy pompy z ustaloną prędkością obrotową wirnika metodą eksploatacyjnej analizy modalnej. W metodzie tej na podstawie zarejestrowanych przebiegów czasowych przyspieszenia drgań wyznacza się funkcje korelacji wzajemnej między mierzonymi równocześnie przebiegami przyspieszeń drgań, a następnie identyfikuje się model modalny. W rozważanym przypadku do przeprowadzenia identyfikacji wybrano metodę BR (ang. Balanced Realization) eksploatacyjnej analizy modalnej [1], [5]. Zastosowanie rozważanej metody prowadzi do

identyfikacji postaci drgań strukturalnych, jeśli są one wymuszane w czasie pracy i/lub określenia postaci (form) drgań dla dominujących składników wymuszenia (harmonik) występujących w czasie pracy pompy. Wyniki analizy pozwoliły na ocenę stopnia wpływu poziomu sztywności dynamicznej w danym paśmie częstotliwości na wielkość amplitudy poszczególnych składników harmonicznnych drgań jak i wskazanie krytycznych obszarów obiektu, których modyfikacja może polepszyć jego stan dynamiczny.

W ostatnim, uzupełniającym etapie badań zostały przeprowadzone badania modalne z zastosowaniem wymuszenia impulsowego wybranych obszarów pompy, odcinków przyległych rurociągów oraz fundamentu. Wyniki tych badań miały za zadanie zarówno zweryfikować jak i uzupełnić wyniki eksploatacyjnej analizy modalnej w celu ułatwienia sformułowania ostatecznych wniosków z badań.

Poniżej zestawiono wybrane wyniki przeprowadzonych badań pompy wodnej, które zdaniem autorów najlepiej ilustrują możliwość i sposób zastosowania rozważanych metod dla celów diagnostyki.

Wstępna analiza danych pomiarowych pokazała, że dla dużych prędkości obrotowych wirnika pompy powstają składowe podharmoniczne. Przykład odwzorowania tych składowych w widmach dynamicznych przedstawiono na rysunku 2. W przedstawionym widmie dynamicznym wyznaczonym dla awaryjnego wyłączenia pompy odwzorowały się składowe $0.8f_i$, $0.9f_i$, f_i (przez f_i oznaczono częstotliwość odpowiadającą prędkości obrotowej wirnika).



Rys. 2. Widmo amplitudy przyspieszeń drgań zmierzone w przed, w czasie i po awaryjnym wyłączeniu pompy.

Analiza wyników pomiaru pokazała, że wraz ze zmniejszaniem się prędkości obrotowej wirnika pompy udział amplitud składowych

podharmonicznych w amplitudzie przyspieszenia drgań szybko maleje.

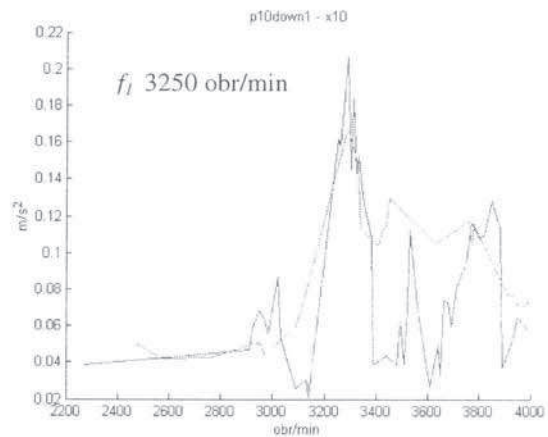
W pierwszej części przeprowadzonej analizy danych pomiarowych podjęto próbę wskazania zakresów wartości częstotliwości, w których następuje wzrost amplitudy drgań w czasie narastania i zmniejszania się prędkości obrotowej wirnika pompy. Przykłady przebiegów amplitudy przyspieszenia drgań odpowiadających składnikom harmonicznym prędkości obrotowej przedstawiono na rysunkach 3.a, 4.a i 5.a. Jedną z przyczyn lokalnego wzrostu amplitudy przyspieszenia drgań może być występowanie w danej częstotliwości lokalnego minimum sztywności dynamicznej konstrukcji, umożliwiającego powstawanie drgań wymuszonych o dużej amplitudzie. Wartość tego maksimum amplitudy drgań jak i wartość prędkości obrotowej, w której ono występuje, zależy jednak nie tylko od własności strukturalnych, ale i od innych czynników takich jak: rozkład temperatury w konstrukcji, wartości ciśnień wody w rurociągu ssawnym i tłocznym czy charakter dynamicznej interakcji między strumieniem wody a elementami pompy.

W drugiej części analizy, przy pomocy metody analizy modalnej, poszukiwano postaci drgań oraz form drgań odpowiadających składowym harmonicznym wymuszenia. Wartości zidentyfikowanych częstotliwości drgań własnych wskazują bezpośrednio zakresy wartości prędkości obrotowych, w których może wystąpić zwiększenie amplitudy drgań będące skutkiem rozkładu przestrzennego własności masowo-sprężystych badanego obiektu. Precyzja tego wskazania jest ograniczona, ponieważ warunki klasycznego eksperymentu modalnego, przeprowadzanego na obiekcie wyłączonym z eksploatacji przy zastosowaniu rejestrowanego i sterowanego wymuszenia, odbiegają od warunków występujących w czasie eksploatacji. Z drugiej strony, w przypadku zastosowania eksploatacyjnej analizy modalnej, możliwa jest identyfikacja tylko tych postaci drgań, które zostały wystarczająco dobrze wymuszone w czasie eksperymentu. Analiza form drgań odpowiadających składowym harmonicznym wymuszenia wskazuje obszary konstrukcji, w których w czasie pracy występują zwiększone amplitudy drgań. Wielkość tej amplitudy zależy zarówno od bliskości źródła wymuszenia jak i od lokalnej sztywności dynamicznej badanego obiektu.

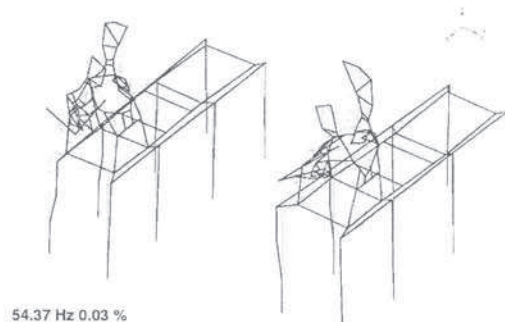
Na rysunkach 3, 4, 5 przedstawiono 3 przykłady wpływu własności strukturalnych badanej pompy na poziom drgań jej konstrukcji.

Pierwszy przypadek dotyczy składowej podharmonicznej $0.9f_1$. Analiza drgań w czasie rozbiegu i wybiegu wskazała na lokalne maksimum amplitudy składowej f_1 dla prędkości obrotowej około 3250 obr/min (54.17 Hz) co pokazuje rysunek 3.a. Na rysunku 3.b pokazano formę drgań składowej podharmonicznej $0.9f_1$ o zbliżonej częstotliwości. W formie tej dominują drgania

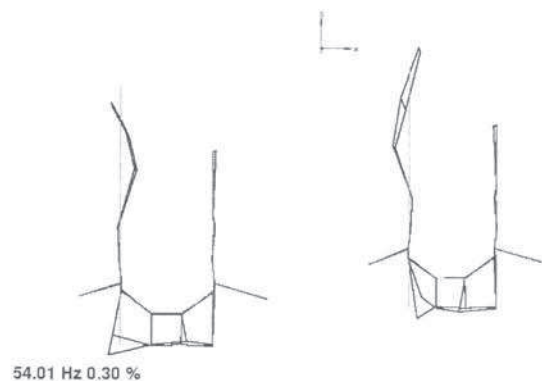
rurociągu ssawnego, które również są dominującym składnikiem postaci drgań własnych o bliskich wartościach częstotliwości drgań własnych zidentyfikowanych w badaniach korpusu pompy (rys. 3.c) i rurociągu ssawnego (rys. 3.d) przeprowadzonych po wyłączeniu pompy z eksploatacji.



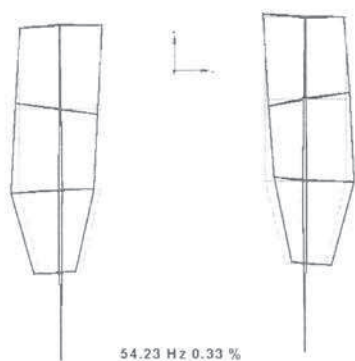
Rys. 3.a. Przebieg amplitudy przyspieszenia drgań obudowy łożyska pompy w czasie rozbiegu i wybiegu dla 1 harmoniki prędkości obrotowej



Rys. 3.b. Forma drgań odpowiadająca składowej podharmonicznej $0.9f_1$.



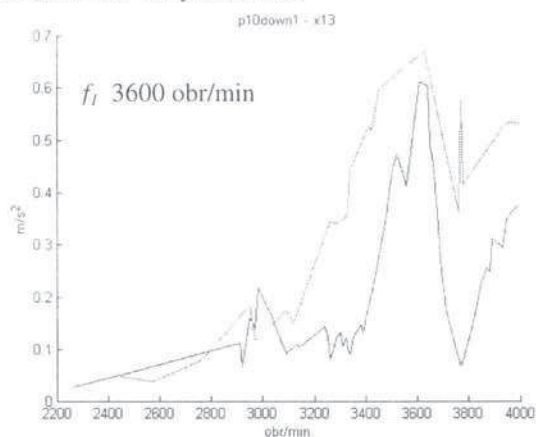
Rys. 3.c. Zidentyfikowana postać drgań własnych



54.23 Hz 0.33 %

Rys. 3.d. Zidentyfikowana postać drgań własnych

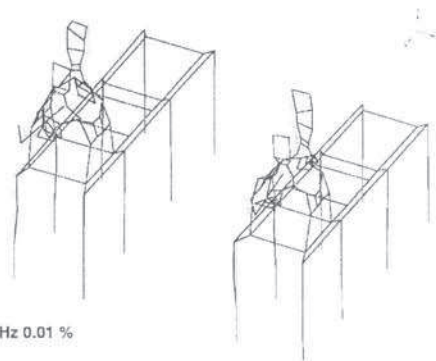
Analogiczny przykład dotyczy pierwszej harmoniki prędkości obrotowej f_1 . Badania drgań w stanie nieustalonym wskazały na wzrost amplitudy przyspieszeń drgań dla wartości prędkości obrotowej około 3600 obr/min (60 Hz). Odpowiedni przebieg przedstawiono na rysunku 4.a.



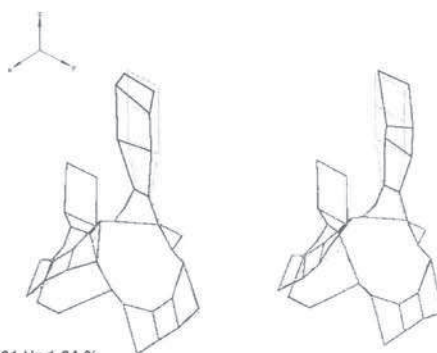
Rys. 4.a. Przebieg amplitudy przyspieszenia drgań obudowy łożyska pompy w czasie rozbiegu i wybiegu dla 1 harmoniki prędkości obrotowej

Na rysunku 4.b przedstawiono formę drgań 1 harmoniki prędkości obrotowej dla rozważanej wartości częstotliwości. Również w tej formie drgań dominują drgania rurociągu ssawnego. Takie drgania dominują też w postaciach drgań własnych o bliskich wartościach częstotliwości drgań własnych zidentyfikowanych w badaniach korpusu pompy (rys. 4.c) i rurociągu ssawnego (rys. 4.d) przeprowadzonych po wyłączeniu pompy z eksploatacji.

Trzeci z przedstawionych przykładów dotyczy składowej $2*0.9f_1$. Przebieg amplitudy drgań drugiej harmoniki prędkości obrotowej, przedstawiony na rysunku 5.a posiada lokalne maksimum dla częstotliwości bliskiej 3400 obr/min (113.34 Hz).

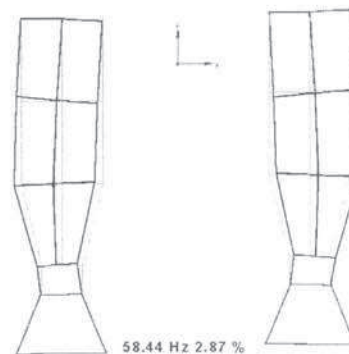


60.43 Hz 0.01 %

Rys. 4.b. Forma drgań odpowiadająca składowej f_1 

60.61 Hz 1.84 %

Rys. 4.c. Zidentyfikowana postać drgań własnych

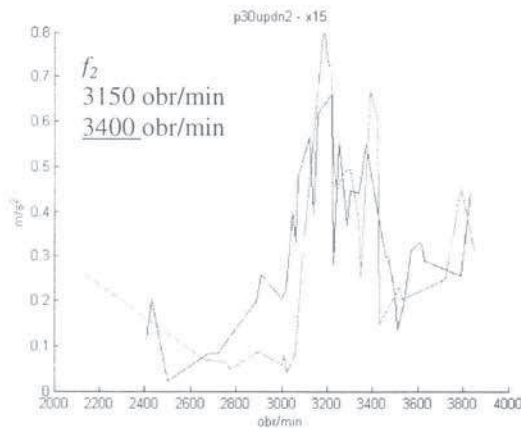


58.44 Hz 2.87 %

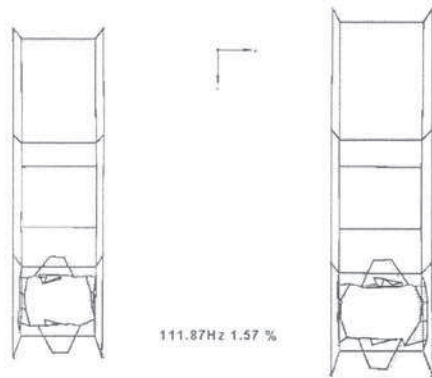
Rys. 4.d. Zidentyfikowana postać drgań własnych

Podobnie jak w pierwszym przykładzie dotyczącym składowej $0.9f_1$ również składowa $2*0.9f_1$ osiąga lokalne maksimum amplitudy dla częstotliwości bliskich 113 Hz. Formę drgań rozważanej składowej przedstawiono na rysunku 5.b. W formie tej dominuje obrót korpusu pompy wokół osi pionowej względem fundamentu agregatu. Taki charakter ma również przedstawiona na rysunku 5.c postać drgań własnych zidentyfikowana na podstawie wyników badań

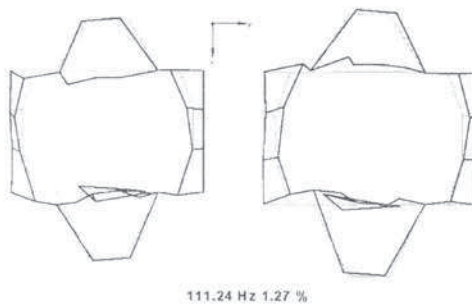
przeprowadzonych po wyłączeniu pompy z eksploatacji.



Rys. 5.a. Przebieg amplitudy przyspieszenia drgań obudowy łożyska pompy w czasie rozbiegu i wybiegu dla 2 harmoniki prędkości obrotowej



Rys. 5.b. Forma drgań odpowiadająca składowej $2*0.9f_1$



Rys. 5.c. Zidentyfikowana postać drgań własnych

Porównując przedstawione powyżej wyniki przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że dla rozważanego obiektu istnieje pewna korelacja między wartościami prędkości obrotowych wirnika pompy, w których występuje zwiększenie amplitudy parametrów drgań w czasie przebiegów

prześciowych i wartościami zidentyfikowanych częstotliwości drgań własnych.

Na podstawie przeprowadzonej analizy zidentyfikowanych form drgań dla składowych harmonicznych wymuszenia oraz zidentyfikowanych postaci drgań własnych można stwierdzić, że rozkład własności masowo sprężystych ma wpływ na poziom amplitud drgań badanej pompy. W szczególności istotne znaczenie mają własności masowo-sprężyste:

- podpór pompy
- odcinka rurociągu ssawnego
- fundamentu agregatu.

Ewentualne kierunki modyfikacji konstrukcji agregatu powinny uwzględnić przede wszystkim modyfikacje: podpór pompy i odcinka rurociągu ssawnego.

Na poziom amplitudy drgań badanego obiektu w czasie eksploatacji, oprócz rozważanych w ramach tego projektu własności masowo-sprężystych, decydujący wpływ ma: poziom amplitud, rozkład przestrzenny, widmo i charakter generacji sił wymuszających. Wysoki udział amplitud składowych podharmonicznych w amplitudzie drgań pompy świadczy o tym, że duża amplituda wymuszenia jest główną przyczyną nadmiernych drgań. Istotne jest, zatem przeprowadzenie dla badanej pompy identyfikacji obciążeń eksploatacyjnych jej konstrukcji i opracowanie propozycji izolacji dominujących źródeł drgań. Generacja drgań o dużych amplitudach w czasie pracy rozważanej pompy może być spowodowana przez charakter interakcji strumienia pompowanej wody i elementów układu przepływowego pompy. Izolacja źródła drgań w takim wypadku wymaga uzyskania odpowiednich zmian charakteru tej interakcji.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Obie procedury składowe przedstawionej na rys. 1 procedury diagnostycznej mogą być w konkretnym przypadku równie istotne i nie można zawężać zakresu działań tylko do realizacji tylko jednej z procedur składowych. To znaczy, że zwykle osiągnięcie efektywnego zmniejszenia nadmiernego poziomu drgań rozważanego układu mechanicznego osiąga się poprzez rozważenie zarówno izolacji źródeł drgań jak i modyfikacji własności strukturalnych.

W wyniku zrealizowanych prac opisano rozkład przestrzenny amplitud dominujących składników drgań badanego obiektu z wykorzystaniem metody eksploatacyjnej analizy modalnej. Oprócz eksperymentalnego modelu modalnego w celu sformułowania diagnozy stanu technicznego znajduje również symulacja tzw. numerycznego modelu modalnego otrzymanego przy pomocy metody elementów skończonych. Tak więc zastosowanie modeli strukturalnych w diagnostyce może być skuteczne już na etapie projektowania, a później na różnych etapach montażu, w trakcie uruchamiania obiektu w miejscu jego eksploatacji oraz cyklicznie w czasie normalnej eksploatacji.

PODZIĘKOWANIA

Autorzy składają podziękowania przedsiębiorstwu ALSTOM Power Sp. z o.o. za możliwość przeprowadzenia badań pompy.

LITERATURA

- [1] Hermans, L., Van der Auweraer, H., Coppens, P., Mathieu, L., Modal parameter extraction from in-operation data, XV IMAC, Orlando, 1996, pp. 531 – 539.
- [2] Heylen, W., Lammens, S., Sas, P., Modal analysis theory and practice, KU Leuven 1997
- [3] Lisowski, W., Mendrok, K., Uhl, T., Wyznaczanie sił działających na konstrukcję na podstawie pomiaru sygnałów odpowiedzi, Materiały V Konferencji Naukowej 'Metody Doświadczalne w Budowie i Eksploatacji Maszyn 2001, Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej, str. 93-102.
- [4] Uhl, T., Komputerowo wspomagana identyfikacja modeli konstrukcji mechanicznych, WNT 1997.
- [5] Uhl, T., Lisowski, W., Eksploatacyjna analiza modalna i jej zastosowania, Wydawnictwo KRiDM AGH, Kraków, 1999
- [6] Uhl, T., Lisowski, W., Identification of modal models of engineering structures using in-operation measurements, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, Vol.48.No.2, 2001, pp.199-217
- [7] Uhl, T., Lisowski, W., Identification of modal models of helicopters using in-flight measurements, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, No.1, Vol.39, 2001, PSTAM Warszawa, pp.104-128
- [8] Uhl, T., Lisowski, W., Jabłoński, J., Wyszyński, J.,:Modal testing as a diagnostic tool – a big fan example, Proc of II International Congress of Technical Diagnostics 2000, Politechnika Warszawska, p1_19.pdf



Prof. zw dr hab. inż. **Tadeusz Uhl**, Urodził się w Nowym Sączu w 1956 roku. Absolwent Akademii Górniczo -Hutniczej w Krakowie. Praca doktorską obronił w 1983 roku, tytuł profesora uzyskał w 1998 roku. Obecnie jest kierownikiem Katedry

Robotyki i Dynamiki Maszyn na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH. Autor ponad 300 publikacji w tym 14 podręczników monografii. Zajmuje się problematyką dynamiki strukturalnej, diagnostyki maszyn, identyfikacji modeli, mechatroniki, oraz konstrukcją systemów monitorowania.



Dr inż. **Wojciech Lisowski** (ur. 1963). Stopień magistra (1987) i doktora nauk technicznych (1995) uzyskał na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo Hutniczej w Krakowie. Autor i współautor 10 artykułów dotyczących badań 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, wspomagania komputerowego podejmowania decyzji w trakcie estymacji parametrów modelu modalnego oraz zastosowań analizy modalnej w warunkach przemysłowych.