

WYKORZYSTANIE MODELI SYMULACYJNYCH W AUTONOMICZNYCH UKŁADACH DIAGNOSTYCZNYCH

Jędrzej MĄCZAK

Instytut Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Warszawskiej
Narbutta 84, 02-524 Warszawa, fax: 22 660 86 22, jma@simr.pw.edu.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono cechy jakie powinien spełniać autonomiczny układ diagnostyczny stosowany do diagnozowania układów mechanicznych. Omówiono możliwości wykorzystania modeli symulacyjnych w tworzeniu takich układów zdolnych do samodzielnego diagnozowania stanu technicznego. Przedstawiono przykład zastosowania modelu do diagnozowania wystąpienia uszkodzeń zmęczeniowych na podstawie analizy struktury sygnału wibroakustycznego.

Słowa kluczowe: autonomiczne układy diagnostyczne, modele symulacyjne, diagnostyka maszyn

THE USE OF SIMULATIONAL MODELS IN AUTONOMOUS DIAGNOSTIC UNITS

Summary

In the paper the characteristics of the autonomous diagnostic unit used for diagnosis of the mechanical systems were given. The possibilities of using simulational models in creating such units being able to self diagnose the technical state were also described. An example of use of the simulational model in diagnosing fatigue damage on the basis of the structure analysis of vibroacoustic signal was presented.

Keywords: autonomous diagnostic units, simulation models, machine diagnostic

1. WSTĘP

Celem pracy jest omówienie możliwości wykorzystania modeli symulacyjnych w tworzeniu autonomicznych układów diagnostycznych elementów i zespołów napędowych zdolnych do samodzielnego diagnozowania stanu technicznego.

2. AUTONOMICZNE UKŁADY DIAGNOSTYCZNE

Osiągnięcia techniki w ciągu ostatnich lat oprócz zwiększenia funkcjonalności produkowanych urządzeń spowodowały rozwój tzw. konstrukcji inteligentnych, czyli konstrukcji zdolnych do samodzielnego określania swojego stanu technicznego i uwzględniania tego stanu podczas podejmowania decyzji odnośnie warunków dalszej pracy zespołu. Konstrukcje te wyposażone są w układy diagnostyczne działające według algorytmu w którym można wydzielić następujące etapy:

1. detekcję uszkodzenia,
2. lokalizację uszkodzenia,
3. identyfikację uszkodzenia i ew. ocenę stopnia krytyczności uszkodzenia,
4. określenie stopnia samonaprawy urządzenia,
5. prognozowanie pozostałego „czasu życia” urządzenia.

Szczególnie kontrowersyjna wydaje się w tej

definicji możliwość automatycznej naprawy uszkodzonej konstrukcji. Może to być realizowane np. poprzez uaktywnienie dodatkowych cięgien usztywniających konstrukcję lub uwolnienie zmagazynowanego kleju mającego połączyć uszkodzone elementy.

Dotychczas zastosowanie konstrukcji wyposażonych w układy samodiagnostujące, z uwagi na koszty i stopień komplikacji było ograniczone do obiektów, których uszkodzenie mogłoby spowodować duże straty w tym zagrożenie życia ludzkiego (np. samochody ciężarowe, samoloty, helikoptery, technologie kosmiczne) [1,2]. Dokonujący się obecnie postęp w diagnostyce technicznej w połączeniu z rozwojem techniki mikroprocesorowej i piezoelektryków pozwala, na opracowanie nowych metod umożliwiających sformułowanie bardziej wiarygodnej prognozy zmian stanu technicznego i tym samym pozwalających na podejmowanie decyzji eksploatacyjnych ze znacznym wyprzedzeniem. Równocześnie mniejsze koszty tego typu układów umożliwiają ich zastosowanie w obiektach technicznych o mniejszym zagrożeniu dla otoczenia i stosunkowo niskiej cenie jak np. układy napędowe.

Dla potrzeb układów mechanicznych prezentowaną wyżej definicję należy zmodyfikować, jako że zazwyczaj nie jest możliwa ich samonaprawa. W układach takich dominują uszkodzenia zmęczeniowe elementów i naprawa polega zazwyczaj na

wymianie tych elementów. Proces ten nie może, z oczywistych przyczyn, zostać zautomatyzowany zatem reakcją na wykryte uszkodzenie powinna być takie działanie, które powstrzyma proces dalszej propagacji tego uszkodzenia. Zatem algorytm pracy układu diagnostycznego, w przypadku układów mechanicznych, należałoby zmodyfikować w następujący sposób:

1. detekcja typu i fazy uszkodzenia zmęczeniowego na podstawie wystąpienia nienormalnej pracy zespołu,
2. diagnoza przyczyn wystąpienia takiej pracy (lokalizacja i identyfikacja uszkodzenia),
3. reakcja na zdiagnozowane uszkodzenie polegająca na modyfikacji parametrów pracy obiektu w celu powstrzymania dalszego rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego,
4. prognozowanie pozostałego „czasu życia” urządzenia.

Poniżej omówiono szerzej te zagadnienia.

2.1. Detekcja uszkodzenia

W celu wykrycia uszkodzenia niezbędne jest wyposażenie zespołu w czujniki odpowiednie do przewidywanych rodzajów uszkodzeń. Układy samodiagnostujące zazwyczaj wyposaża się w elementy piezoelektryczne, czujniki emisyjności akustycznej, czujniki mierzące skład chemiczny (np. oleju), przewodność elektryczną, poziom drgań, temperaturę, itp. w zależności od przewidywanych możliwych do obserwacji symptomów. W literaturze zaczęły pojawiać się w ostatnich latach doniesienia o próbach stosowania węzłów konstrukcji wyposażonych w elementy umożliwiające samodiagnozę. Jako przykład można tu przywołać przykład inteligentnego łożyska [3], którego bieżnia jest wyposażona w piezoelektryczny element mierzący jej obciążenie i drgania jej struktury. Dołączony układ elektroniczny pozwala na analizę on-line sygnałów i odpowiednią sygnalizację w przypadku gdy pojawią się symptomy świadczące o nieprawidłowej pracy łożyska.

2.2. Lokalizacja i identyfikacja uszkodzenia

Po wykryciu symptomów świadczących o nieprawidłowej pracy (np. podwyższony poziom drgań węzła kinematycznego) system powinien dokonać diagnozy przyczyn wystąpienia nienormalnej pracy w celu określenia rodzaju uszkodzenia.

W przypadku układów mechanicznych szczególne zainteresowanie budzi możliwość prognozowania wystąpienia zmęczeniowych uszkodzeń na podstawie analizy struktury sygnału wibroakustycznego. Odnosi się to przede wszystkim do badania procesu generowania i transmisji informacji diagnostycznej. Z tego punktu widzenia szczególne miejsce zajmują zagadnienia wczesnego rozpoznawania uszkodzeń węzłów kinematycznych diagnozowanego obiektu i wiarygodnego określenia okresu przedawaryjnego.

Uszkodzenia tego typu z reguły są przyczyną występowania niskoenergetycznych, impulsowych zaburzeń w układzie i wywołują szerokopasmową odpowiedź o niewielkiej amplitudzie. Jest to między innymi powodem tego, że analiza spektralna uśrednionego widma mocy, tak użyteczna w rozpoznawaniu stanów granicznych, w zadaniu różnicowania poszczególnych typów uszkodzeń, okazuje się narzędziem mało efektywnym.

W tym sensie szczególnego znaczenia nabiera analiza procesu generacji sygnału wibroakustycznego. Rozpatrując obiekt rzeczywisty, np. przekładnię zębatą, należy badać przede wszystkim strukturę częstotliwościową widma drgań w przeciwieństwie do typowego ujęcia w którym operuje się wartościami skutecznymi sygnałów [4]. Wynika to ze spostrzeżenia, że zaburzenia przyporu przekładni zębatej wywołują efekty modulacji amplitudowo-fazowej lub fazowej. Zatem poprzez określenie odpowiednich funkcji nośnych i związanie zaburzeń z odpowiednimi parametrami funkcji modulujących, typem i wielkością modulacji, powinno być możliwe wnioskowanie o jakości współpracy pary zębatej.

2.3. Reakcja na zdiagnozowane uszkodzenie

Zastosowanie autonomicznych systemów, które w sposób ciągły monitorują zachowanie się zespołu, pozwala na znaczne zwiększenie bezpieczeństwa eksploatacji zwłaszcza tam, gdzie awaria może spowodować zagrożenie bezpieczeństwa ludzi lub powodować duże koszty. Układy takie w przypadku detekcji uszkodzenia powinny umożliwić kontrolę rozwoju uszkodzenia zmniejszając w ten sposób prawdopodobieństwo wystąpienia awarii. Reakcją na wykryte uszkodzenie powinna być decyzja o zmianie warunków eksploatacyjnych skutkująca zmniejszeniem obciążenia konstrukcji i powstrzymaniem dalszej propagacji zmęczeniowego uszkodzenia maszyny.

Jako przykład można podać np. zespół wentylatorów który w przypadku stwierdzenia stanu awaryjnego jednego z nich (np. pęknięcie wirnika) zmniejsza obciążenie wentylatora poprzez przymknięcie kierownic lub jednocześnie uruchamia inny, sprawny wentylator zatrzymując uszkodzony.

3. METODY DETEKCJI I DIAGNOZY USZKODZEŃ

Metody detekcji i diagnozy można podzielić na dwie grupy:

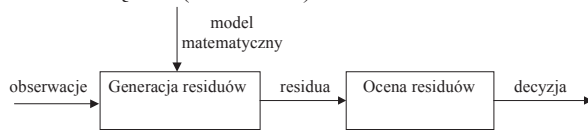
1. metody oparte na analizie symptomów (diagnostyka symptomowa),
2. metody wsparte modelami matematycznymi (diagnostyka wsparta modelowo).

W przypadku pierwszym, zmiany stanu technicznego powodują zmiany parametrów diagnostycznych. Po przeprowadzeniu wnioskowania diagnostycznego określa się związek: *symptom* \Leftrightarrow *stan techniczny maszyny*.

$$y = Ax \Rightarrow x = A^{-1}y \quad (1)$$

gdzie y jest symptomem stanu technicznego x .

W przypadku diagnostyki wspartej modelowo model matematyczny reprezentuje poprawną pracę urządzenia, a odpowiednie wielkości symulowane porównywane są z mierzonymi. Powstające różnice zwane reszduami są wskazówkami odnośnie istnienia błędów (uszkodzeń) w układzie.

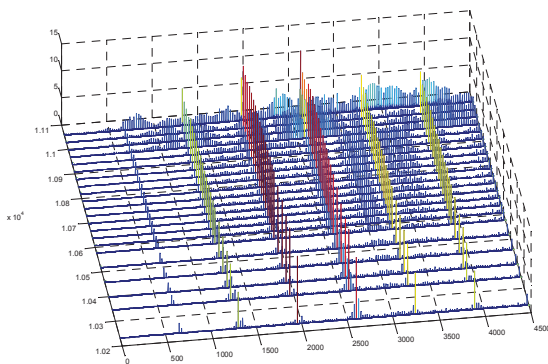


Rys. 1. Schemat procesu generowania sygnału residualnego

Poniżej przedstawiono przykład tworzenia sygnału residualnego wykorzystując zamiast modelu matematycznego sygnał pochodzący z eksperymentu

3.1. Eksperyment laboratoryjny

Eksperyment laboratoryjny, szerzej opisany w [5] polegał na rejestracji przebiegów przyspieszeń drgań korpusu testowej przekładni zębatej pracującej w układzie mocy krążącej aż do całkowitego wyłamania zęba zębniaka. Na rys. 2 przedstawiono widma synchroniczne przyspieszeń drgań w końcowym etapie eksperymentu.



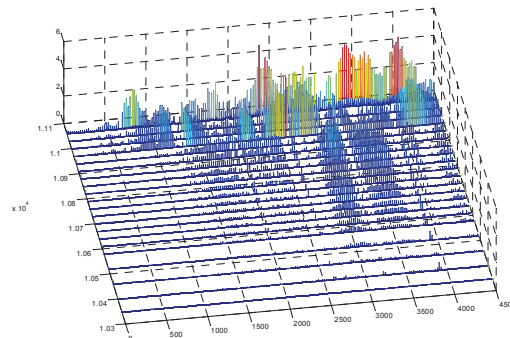
Rys. 2. Analiza widmowa przyspieszeń drgań korpusu reduktora w czasie poprzedzającym wyłamanie zęba

Wykorzystując jako wzorzec jeden z pomiarów charakterystycznych dla pracy prawidłowej obliczono widma residualne jako różnice pomiędzy kolejnymi widmami i widmem wzorcowym. Wynik pokazano na rys. 3.

Przedstawione widmo residualne pokazuje wyraźnie pasma częstotliwości o podwyższonej wibroaktywności związane z postępującym uszkodzeniem zmęczeniowym zęba. Analiza tych pasm w zestawieniu z widmami uzyskanymi dla innych rodzajów uszkodzeń pozwala na określenie rodzaju uszkodzenia i jego wielkości.

Przedstawiony przykład pokazuje możliwość diagnozowania jakie daje porównywanie z sygnałem

wzorcowym. Z uwagi na zmienne warunki pracy (obciążenie, prędkość obrotowa) wskazane byłoby stosowanie jako sygnału wzorcowego sygnału wygenerowanego przy pomocy modelu uwzględniającego zmienność tych parametrów.



Rys. 3. Widmo residualne dla przypadku z rys. 2

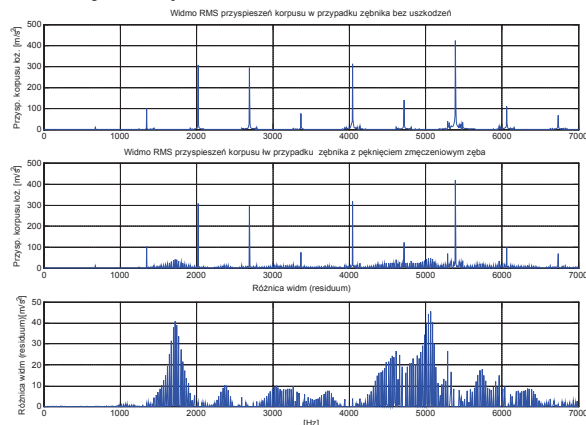
4. MODELE SYMULACYJNE

Budowa modeli jest zazwyczaj zadaniem trudnym i skomplikowanym, wymagającym dużej znajomości procesów generacji symptomów świadczących o możliwych uszkodzeniach. Trudno jednak przecenić korzyść z posiadania poprawnie zidentyfikowanego modelu obiektu, gdyż pozwala on na badanie zachowania się obiektu w przypadku wystąpienia uszkodzeń bez odwoływania się do eksperymentu.

Ogólnie zwraca się uwagę na fakt, że uszkodzenia powierzchni kontaktowych, zużycie korozyjne i erozyjne, powstawanie szczelin i wykruszeń są przyczyną występowania zjawisk modulacji amplitudowej, fazowej i wieloparametrycznej sygnału wibroakustycznego [6]. Wynika z tego, że model oprócz uwzględnienia zmian w rozkładzie mocy dla określonej harmoniki, lub pomiędzy harmonikami, powinien wyróżniać funkcje modulujące i modulowane oraz opisywać występujące zjawiska modulacji. Dodatkowe trudności wywołuje fakt, że wraz z rozwojem uszkodzeń, zbiór diagnostycznie informacyjnych funkcji modulujących i nośnych może ulegać zmianom [7,8]. Jeżeli równolegle uwzględni się trudności występujące przy obróbce sygnałów zmodulowanych wieloparametrowo, to niezadowalająca, jak dotychczas, efektywność tego typu modeli w diagnozowaniu procesu uszkodzeń staje się bardziej zrozumiała. Z drugiej strony niewielki poziom sygnału użytecznego w stosunku do szumów i konieczność zastosowania odpowiedniej selekcji cech sygnału, w centrum uwagi stawiają wybór parametrów diagnostycznych o dużej informacyjności.

Podstawą diagnozowania procesu powstawania i rozwoju uszkodzenia mogą być modele odwołujące się do zjawiska modulacji amplitudowo-fazowej sygnału wibroakustycznego. Dotyczy to przede wszystkim prób modelowania zjawisk modulacji,

stymulowanych występowaniem określonych błędów wykonawczo-montażowych lub uszkodzeniami eksploatacyjnymi [9,10]. Zauważmy, że jeżeli uszkodzenie wywołuje równocześnie modulację amplitudową i fazową, to obwiednia i faza mogą być nośnikami informacji o tym samym uszkodzeniu [5,11,12]. W konsekwencji najważniejszym zadaniem jest modelowanie i identyfikacja podstawowej częstotliwości funkcji modulującej, charakterystycznej dla określonego uszkodzenia, natomiast cenność informacji rozróżniającej typ modulacji zależy od modelu uszkodzenia.



Rys. 4. Przykład obliczania residuów dla modelu reduktora w przypadku zmęczeniowego pęknięcia stopy zęba

Szczególne problemy występują w przypadku modelowania diagnostycznie istotnego procesu generacji drgań przez pary kinematyczne z lokalnie uszkodzonymi powierzchniami kontaktowymi. Przykład takiego modelu przedstawiono w [12]. Na rys. 4 pokazano widmo residualne uzyskane dla tego modelu w przypadku pracy reduktora ze szczeliną zmęczeniową w podstawie zęba.

5. WNIOSKI

Przedstawione wyniki pokazują, że podstawą wnioskowania o zmęczeniowych uszkodzeniach elementów maszyn może być analiza residualna polegająca na porównywaniu sygnału referencyjnego (symulowanego lub rzeczywistego) z sygnałem generowanym przez uszkodzony obiekt. Uszkodzenia takie powodują ilościowe i jakościowe zmiany w sygnale residualnym. Modele na podstawie których są obliczane residua powinny być ukierunkowane na właściwą reakcję w obliczu błędów (uszkodzeniowo zorientowane). Mogą one znaleźć zastosowanie w autonomicznych układach diagnostycznych przeznaczonych do diagnozowania uszkodzeń zmęczeniowych i stanowić podstawę do określenia reakcji układu determinującej zahamowanie procesu propagacji diagnozowanego uszkodzenia (np. pęknięcia zmęczeniowego).

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2003-2005 jako projekt badawczy.

LITERATURA

- [1] Cronkhite J. D. Practical application of health and usage monitoring (HUMS) to helicopter rotor, engine and drive systems. AHS 49th Annual Forum, May 19-21, 1993 Str. Luis, MO, USA.
- [2] Stevens P. W., Hall D. L., Smith E. C. Multidisciplinary approach to rotorcraft health and usage monitoring. American Helicopter Society, 52nd Annual Forum, June 4-6, 1996, Washington, DC, USA.
- [3] Holm-Hansen B. T., Gao R. X., Structural design and analysis for a sensor-integrated ball bearing. Finite Elements in Analysis and Design 34(200), p. 257-270.
- [4] Wilk A.: Wibroakustyczne metody diagnozowania przekładni zębatych. Przegląd Mechaniczny Nr 11-12/98.
- [5] J. Mączak, S. Radkowski: Use of envelope contact factor in fatigue crack diagnosis of helical gears. Machine Dynamics Probl., 2002.
- [6] Randall R. B.: A New Method of Modelling Gear Faults. Journal of Mechanical Design, Vol. 104, April 1982, s. 259-267.
- [7] Mączak J., Radkowski S.: Low-energy Spectrum Components as a Symptom of Failure. Machine Dynamic Problems, 8, 1994, s. 45-64.
- [8] Radkowski S.: Low-energy Components of Vibroacoustic Signal as the Basis for Diagnosis of Defect Formation. Rozprawa habilitacyjna. Machine Dynamics Problems, vol. 12. 1995
- [9] Mączak J.: Wykorzystanie Zjawiska Modulacji Sygnału Wibroakustycznego w diagnozowaniu przekładni o zębach śrubowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 1998.
- [10] Sweeney P. J., Randall R. B.: Sources of Gear Signal Modulation. Second Int. Conference on Gearbox Noise, Vibration and Diagnostics, 1995, Proc. IMechE, s. 183-198.
- [11] R. Filonik., J. Mączak, S. Radkowski: Simulation and modeling of low-energy tooth failure in helical gearbox. Machine Dynamics Problems, 2002.
- [12] J. Mączak, S. Radkowski: Algorytm wczesnego wykrywania zmęczeniowego uszkodzenia zębów w przekładni zębatej. XXIX Sympozjum Diagnostyka Maszyn. Węgierska Górka 2002.



Dr inż. Jędrzej Mączak jest adiunktem w Instytucie Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Warszawskiej. W pracy naukowej zajmuje się diagnostyką maszyn, modelowaniem matematycznym układów

napędowych i metodami analizy sygnałów wibroakustycznych.