

SYSTEM MONITOROWANIA STANU MASZYN WIRNIKOWYCH NA PRZYKŁADZIE STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Jarosław BEDNARZ, Tomasz BARSZCZ, Tadeusz UHL

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki,
Katedra Robotyki i Mechatroniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland
bednarz@agh.edu.pl, tbarszcz@uci.agh.edu.pl, tuhl@agh.edu.pl

Streszczenie

Analiza sygnałów drganiowych może być z powodzeniem wykorzystywana w diagnostyce stanu dynamicznego maszyn i urządzeń. Wraz z ciągłym rozwojem nowoczesnych technik komputerowego przetwarzania sygnałów w systemach diagnostycznych zaczęto wykorzystywać coraz bardziej złożone techniki analizy widmowej sygnałów. W artykule zaprezentowano zastosowanie technik diagnostycznych opartych na modelach do wczesnego wykrywania uszkodzeń maszyn wirnikowych. Proponowane podejście bazuje na dwóch metodach – analizie modalnej oraz nieliniowych modelach parametrycznych. Proponowany system diagnostyczny został przetestowany na modelu maszyny wirnikowej, który umożliwia wprowadzanie znanych uszkodzeń. W ostatniej części artykułu omówione zostały praktyczne aspekty zastosowania proponowanych metod dla obiektów rzeczywistych.

Słowa kluczowe: analiza modalna, metoda OMAX, modele NARX, system diagnostyczny.

ROTATING MACHINERY MONITORING SYSTEM – A LABORATORY CASE STUDY

Summary

Vibration analysis has found widespread application for condition monitoring in a variety of applications and industries. With the continual development of cheaper and more powerful processing hardware, such systems have developed from utilizing simple checks on amplitude to those based around sophisticated spectral analysis. The paper presents application of the model based diagnostic method for early detection of faults in rotating machinery. The proposed diagnostics system based on two methods – modal analysis and non-linear signals models. In the paper the diagnostic system based on such modelling is presented. The proposed system was verified during research on a specialized test rig, which can generate vibration signals. In the last chapter, practical aspects of the developed diagnostics system application are discussed, i.e. sensitivity of the method and effort needed to apply the method on a real machine

Keywords: modal analysis, OMAX method, NARX models, rotating machinery diagnostic system.

1. WPROWADZENIE

Maszyny wirnikowe są powszechnie wykorzystywane w wielu dziedzinach przemysłu. Większość procesów przemysłowych, w których wytwarzana jest energia bazuje właśnie na maszynach tego typu. Dlatego też konieczne jest utrzymanie tych maszyn w dobrym stanie technicznym. Główne wymagania stawiane nowoczesnym systemom diagnostycznym przez ich użytkowników to:

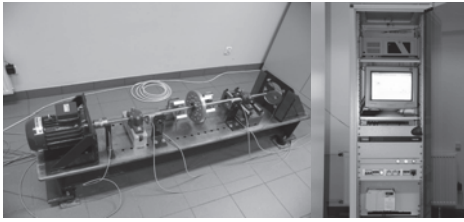
- wczesne wykrycie pojawienia się uszkodzenia i jego lokalizacja,
- zmniejszenie kosztów obsługi,
- możliwość elastycznego dopasowania systemu do konkretnych wymagań użytkownika końcowego.

Takie wymagania wymagają ciągłego rozwoju istniejących już technik diagnostycznych oraz poszukiwania nowych algorytmów. Prace związane

z identyfikacją stanu maszyn wirnikowych prowadzone

i rozwijane są już od wielu lat. Wraz z rozwojem nauki możliwa stała się identyfikacja oraz dokładny opis wielu nieliniowych zjawisk dynamicznych występujących w maszynach wirnikowych. W ostatnich latach coraz bardziej obiecującą techniką diagnostyczną jest zastosowanie technik bazujących na modelach maszyn lub modelach sygnałów drganiowych zarejestrowanych w danym układzie [1]. Takie podejście umożliwia nie tylko wykrycie uszkodzenia ale również jego szybkość i precyzyjną lokalizację. W artykule przedstawiony jest system diagnostyczny turbosopłów energetycznych oparty na wykorzystaniu metod analizy modalnej (w szczególności metody OMAX – Operational Modal Analysis with eXogenous inputs) oraz nieliniowych parametrycznych modelach sygnałów NARX (Non-linear

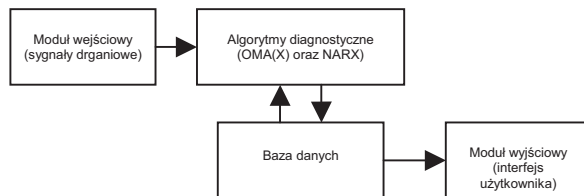
Autoregressive model with eXogenous inputs). Proponowane przez autorów algorytmy zostały przetestowane na modelu maszyny wirnikowej (rys. 1), którego dokładny opis można znaleźć np. w [2].



Rys.1. Stanowisko laboratoryjne

2. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA SYSTEMU MONITOROWANIA TURBOZESPOŁÓW ENERGETYCZNYCH

Ogólny schemat proponowanego przez autorów systemu monitorowania turbozespołów energetycznych przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Ogólny schemat systemu diagnostycznego

Pierwszym z modułów systemu diagnostycznego – modułem wejściowym – jest układ czujników umożliwiający rejestrację przebiegów czasowych amplitud drgań monitorowanej maszyny. W proponowanym przez autorów systemie nie ma konieczności montażu dodatkowych czujników co umożliwia wykorzystanie proponowanych algorytmów w już istniejących systemach diagnostycznych jako dodatkowy moduł.

W kolejnym z modułów zaimplementowane są proponowane w artykule algorytmy diagnostyczne – OMA(X) oraz NARX. W przypadku gdy użytkownik prowadzi diagnostykę maszyny z wykorzystaniem metod analizy modalnej w tym module estymowane są jej parametry modalne (częstotliwości drgań własnych oraz współczynniki tłumienia modalnego). W tym przypadku w tym module jest również zaimplementowany mechanizm sprawdzający czy w trakcie rejestracji przebiegów czasowych amplitud drgań układu wykorzystane zostało dodatkowe źródło zewnętrznego wymuszenia. Jeżeli takie dodatkowe wymuszenie zostało wykorzystane do estymacji parametrów modalnych wykorzystywany jest algorytm OMAX, w trakcie normalnej pracy danej maszyny wykorzystywany jest w trybie on-line algorytm OMA. W przypadku korzystania przez użytkownika z diagnostyki opartej na modelu NARX w tym

module wyznaczana jest wartość sumy kwadratów błędów (NSSE – Normalized Sum of Squared Errors) pomiędzy rzeczywistą wartością wyjść układu a wartością przewidywaną.

Baza danych wykorzystywana jest do przechowywania danych zarejestrowanych przez czujniki (sygnaly czasowe), danych referencyjnych ze stanu poprawnego maszyny oraz parametrów modalnych i NSEE estymowanych w trakcie działania systemu diagnostycznego.

Interfejs użytkownika wykorzystywany jest do prezentacji danych diagnostycznych – parametrów modalnych oraz NSEE wyznaczonych z wykorzystaniem proponowanych algorytmów diagnostycznych. W tym module prezentowane jest również porównanie aktualnych oraz referencyjnych widm rejestrowanych sygnałów drganiowych.

Architektura proponowanego systemu diagnostycznego powinna umożliwić wykorzystanie istniejącego już na danej maszynie układu monitorowania jej stanu dynamicznego. Planowane jest:

- użycie istniejącego układu pomiarowego do rejestracji przebiegów czasowych amplitud drgań diagnozowanej maszyny,
- implementacja algorytmów diagnostycznych,
- przechowywanie danych diagnostycznych w istniejącej bazie danych.

W kolejnych podrozdziałach przedstawiony jest szczegółowy opis proponowanych algorytmów diagnostycznych.

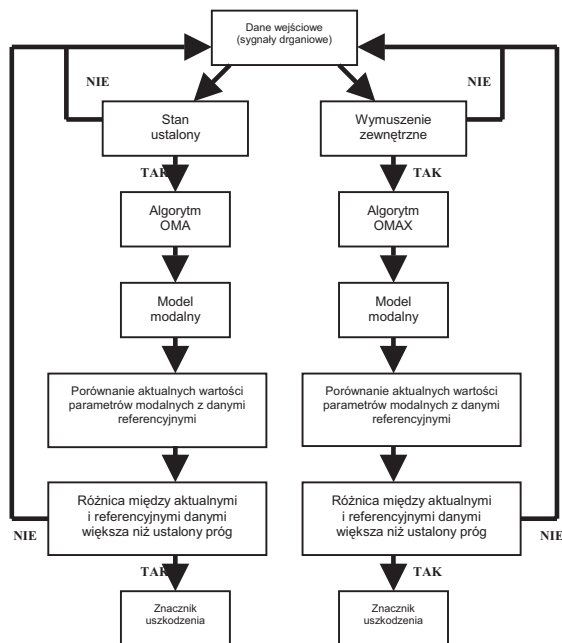
3. ALGORYTM DIAGNOSTYCZNY OPARTY NA METODZIE OMA(X)

Ogólny schemat proponowanego algorytmu diagnostycznego opartego na metodzie OMA(X) przedstawiony jest na rysunku 3.

Pierwszym etapem proponowanego algorytmu diagnostycznego jest rejestracja oraz przygotowanie przebiegów czasowych amplitud drgań danego układu. W przypadku korzystania z metod eksploatacyjnej analizy modalnej zarejestrowane przebiegi czasowe drgań powinny mieć długość minimalną około 90 sekund. Długość zarejestrowanych przebiegów czasowych ma istotny wpływ na rozdzielczość częstotliwościową widm sygnałów oraz widmowych funkcji przejścia (WFP) co z kolei wpływa na dokładność estymacji częstotliwości drgań własnych badanego obiektu. Ponieważ proponowany algorytm działa w trybie ciągłym proponowana jest rejestracja oraz wykorzystanie do dalszej analizy sygnałów o długości około 10 minut. Rejestrowane sygnały zapisywane są w bazie danych systemu diagnostycznego a następnie wykorzystywane do estymacji parametrów modalnych monitorowanej maszyny.

Kolejnym etapem algorytmu jest sprawdzenie czy w trakcie rejestracji przebiegów czasowych w układzie zastosowano zewnętrzne źródło

wymuszenia do dodatkowego pobudzenia drgań układu. Jeżeli dodatkowe źródło wymuszenia zostało użyte algorytm diagnostyczny automatycznie wykorzystuje metodę OMAX do estymacji parametrów modalnych, jeżeli nie – metodę OMA. Szczegółowy opis tych metod można znaleźć np. w [2], [3]. Do estymacji parametrów modalnych układu należy wykorzystywać dwie różne metody dobierane w zależności od sposobu pobudzania drgań układu ponieważ zawartość zbioru parametrów modalnych układu zależy od zastosowania lub nie sterowanego wymuszenia w trakcie realizacji procedury diagnostycznej. W celu zewnętrznego wymuszenia drgań maszyny wirnikowej można zastosować sterowane aktywne łożysko magnetyczne. W naszym przypadku zamiast łożyska zastosowano specjalizowany wzbudnik elektromagnetyczny, którego opis znajduje się w kolejnym podrozdziale.



Rys. 3. Schemat algorytmu diagnostycznego opartego na metodzie OMA(X)

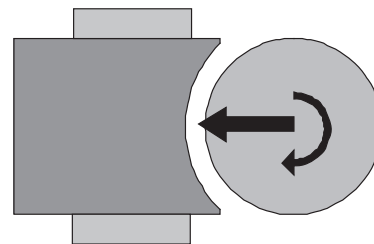
Trzecim etapem działania algorytmu jest estymacja parametrów modalnych monitorowanego układu. W tym etapie estymowane są wartości częstotliwości drgań własnych oraz odpowiadających im współczynników tłumienia modalnego w wybranym przez użytkownika zakresie częstotliwości. Należy tutaj zwrócić uwagę na konieczność rozróżnienia danych rejestrowanych przez czujniki przemieszczeń oraz czujniki przyspieszeń. Estymacja parametrów modalnych układu powinna odbywać się sekwencyjnie – najpierw dla czujników przemieszczeń, a następnie dla czujników przyspieszeń. W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymujemy dwa zestawy parametrów modalnych badanego układu – jeden dla czujników przemieszczeń oraz drugi dla czujników przyspieszeń. Oba te zestawy danych

zapisywane są w bazie danych systemu diagnostycznego.

Ostatnim etapem działania algorytmu jest porównanie aktualnych parametrów modalnych maszyny z danymi referencyjnymi zapisanymi w bazie danych. Jako dane referencyjne wykorzystywane są parametry modalne układu zdatnego zarejestrowane w momencie wprowadzenia danej maszyny do normalnej eksploatacji. Aktualne oraz referencyjne parametry modalne układu wprowadzane są do modułu oprogramowania, który porównuje je ze sobą. Jeżeli korelacja pomiędzy modelem układu zdatnego, a wynikami eksperymentu diagnostycznego jest bliska jedności to w takim wypadku układ uznawany jest za obiekt bez uszkodzeń i algorytm rozpoczyna swoje działanie od początku. Jeżeli natomiast korelacja jest mała to można wnioskować o uszkodzeniu występującym w obiekcie i wystawiany jest znacznik uszkodzenia, który informuje obsługę maszyny o jego pojawieniu się.

3.1. Opis wzbudnika elektromagnetycznego

W celu zbadania możliwości wykorzystania wzbudnika elektromagnetycznego do bezkontaktowego wymuszania drgań obiektu zaprojektowano i zbudowano wzbudnik o elektromagnesie typu E. W celu zapewnienia właściwej charakterystyki siły magnetycznej oraz maksymalizacji jej wartości jedna ze stron elektromagnesu została specjalnie zbudowana – jej kształt został dopasowany do kształtu wałka zamontowanego na stanowisku (rys. 4, rys. 5).



Rys. 4. Zaprojektowany elektromagnes



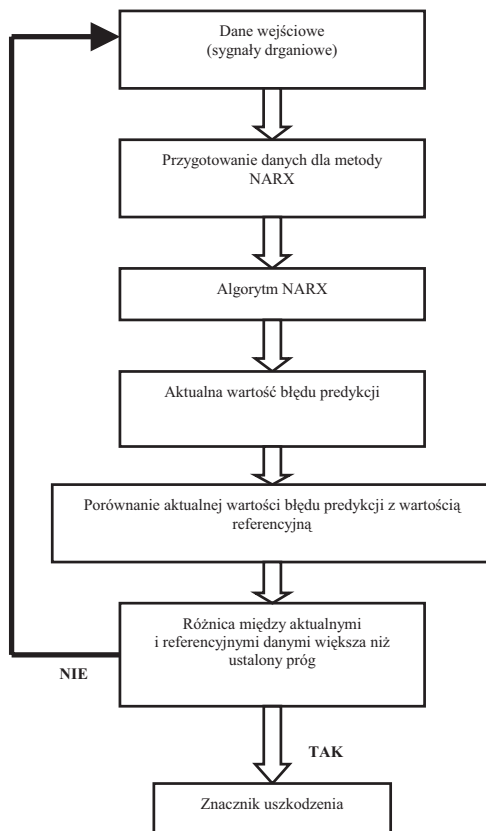
Rys.5. Wzbudnik elektromagnetyczny

Promień elektromagnesu ustalono na 13,4 [mm]. Szczelina powietrzna o szerokości 0,9 [mm] oraz natężenie prądu cewki o wartości 3 [A] pozwala uzyskać siłę elektromagnetyczną o maksymalnej

wartości 300 [N]. Rozmiary elektromagnesu oraz parametry cewki zostały dobrane odpowiednio do stanowiska. Elektromagnes zasilany jest ze sterownika prądowego. Do regulacji i ograniczania wartości prądu płynącego przez uzwojenie cewki wykorzystywany jest mostek mocy wraz z układem sprzężenia zwrotnego, który odpowiedzialny jest za przesyłanie informacji o rzeczywistej wartości natężenia prądu. Mostek mocy zbudowany jest z 4 tranzystorów i 4 diod połączonych w konfiguracji H. Regulator sprzętowy wykorzystując analogowy sygnał referencyjny monitoruje wartość natężenia prądu w uzwojeniu cewki, porównuje go zadaną wartością progową i steruje pracą mostka. Kontroler sprzętowy pozwala na szybką i precyzyjną zmianę wartości natężenia prądu płynącego w cewce.

4. ALGORYTM DIAGNOSTYCZNY OPARTY NA MODELU NARX

Ogólny schemat proponowanego algorytmu diagnostycznego opartego na modelu NARX przedstawiony jest na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat algorytmu diagnostycznego opartego na modelu NARX

Pierwszym etapem proponowanego algorytmu diagnostycznego jest rejestracja przebiegów czasowych amplitud drgań danego układu. Ponieważ proponowany algorytm działa w trybie ciągłym proponowana jest rejestracja oraz wykorzystanie do dalszej analizy sygnałów o długości około 2 minut.

Rejestrowane sygnały zapisywane są w bazie danych systemu diagnostycznego a następnie wykorzystywane do estymacji sumy kwadratów błędów pomiędzy rzeczywistą wartością wyjść układu a wartością przewidywaną.

Kolejnym etapem działania algorytmu jest przygotowanie danych wejściowych do sztucznej sieci neuronowej (SSN) za pomocą której wyznaczane są parametry modelu NARX. Dokładny opis sposobu wyznaczenia modeli tego typu można znaleźć w [4], [5]. Na tym etapie działania algorytmu zarejestrowane przebiegi czasowe dzielone są na osobne podzbiory zawierające „n” próbek (n – ilość próbek określana przez operatora systemu diagnostycznego). Takie zbiory danych przygotowywane są osobno dla każdego kanału drganiowego. W przypadku pierwszego uruchomienia systemu na maszynie, która wprowadzana jest do normalnej eksploatacji zestawu takich danych należy potraktować jako zbiory uczące dla SSN i na ich podstawie obliczyć referencyjną wartość NSEE. Zarówno zbiory uczące jak i referencyjna wartość NSEE jest zapisywana w bazie danych systemu diagnostycznego.

W kolejnym etapie działania algorytmu na podstawie zarejestrowanych danych wyznaczane są parametry aktualnego modelu NARX badanego układu. Na tym etapie wyznaczana jest aktualna wartość sumy kwadratów błędów pomiędzy rzeczywistą wartością wyjść układu a wartością przewidywaną (NSEE) oddzielnie dla każdego z czujników zainstalowanych w układzie. Należy tutaj zwrócić uwagę na konieczność rozróżnienia danych rejestrowanych przez czujniki przemieszczeń oraz czujniki przyspieszeń. Estymacja aktualne wartości NSEE dla każdego kanału drganiowego układu powinna odbywać się sekwencyjnie – najpierw dla czujników przemieszczeń, a następnie dla czujników przyspieszeń. W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymujemy dwa zestawy aktualnej wartości NSEE badanego układu – jeden dla czujników przemieszczeń oraz drugi dla czujników przyspieszeń. Oba te zestawy danych zapisywane są w bazie danych systemu diagnostycznego.

Ostatnim etapem działania algorytmu jest porównanie aktualnych wartości NSEE z ich wartościami referencyjnymi zapisanymi w bazie danych. Aktualne oraz referencyjne wartości NSEE układu wprowadzane są do modułu oprogramowania, który porównuje je ze sobą. Jeżeli różnica wartości pomiędzy aktualnymi a referencyjnymi wartościami NSEE jest poniżej dopuszczalnego ustalonego przez użytkownika progu to w takim wypadku układ uznawany jest za obiekt bez uszkodzeń i algorytm rozpoczyna swoje działanie od początku, jeżeli różnica przekracza ustalony próg wystawiany jest znacznik uszkodzenia, który informuje obsługę maszyny o jego pojawieniu się.

W kolejnym rozdziale przedstawione są wyniki testowania proponowanych algorytmów

diagnostycznych dla danych zarejestrowanych na modelu maszyny wirnikowej

5. WYNIKI EKSPERYMENTÓW

Proponowany system diagnostyczny turbospołów energetycznych został przetestowany pod kątem możliwości jego zastosowania w diagnostyce pęknięcia łopatek. W tym celu na końcu wału stanowiska zamontowano wirnik z łopatkami a następnie wprowadzono uszkodzenie (symulacja pęknięcia) jednej z łopatek (rys. 7). W kolejnych podrozdziałach przedstawione są wyniki testowania proponowanych algorytmów diagnostycznych.



Rys. 7. Uszkodzona łopaska

5.1. Algorytm oparty na metodzie OMA(X)

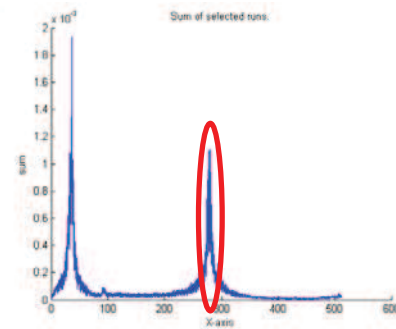
Jednym z etapów badań prowadzonych przez autorów było zastosowanie zaprojektowanego wzbudnika elektromagnetycznego oraz proponowanego algorytmu diagnostycznego opartego na metodzie OMAX do detekcji pęknięć łopatek. Idea algorytmu diagnostycznego opierała się na wymuszaniu drgań łopatek z częstotliwością równą pierwszej częstotliwości drgań własnych (CDW) badanych łopatek w czasie ruchu wirnika. Eksperyment przeprowadzono w następujących etapach:

- wyznaczenie pierwszej CDW łopaski,
- wymuszenie układu sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości pierwszej CDW badanych łopatek,
- pomiar przyspieszeń drgań na łożyskach,
- estymacja parametrów modalnych badanego układu.

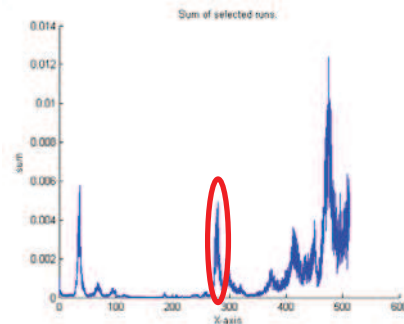
Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono charakter zarejestrowanych WFP na łopasce i łożysku badanego układu. Analiza tych wykresów pozwala stwierdzić, że zastosowanie wzbudnika elektromagnetycznego pozwala na wymuszenie pierwszej postaci drgań własnych i zarejestrowanie jej z wykorzystaniem akcelerometrów umiejscowionych na pokrywach łożysk.

Analiza wyników estymacji CDW układu pozwala stwierdzić, że wprowadzenie pęknięcia spowodowało zmianę częstotliwości rezonansowych badanego układu w przypadku wprowadzenia uszkodzenia. Zmiana ta pojawia się w okolicy 280 [Hz] – częstotliwości występowania pierwszej postaci drgań własnych łopatek. Wartość pierwszej CDW łopatek zmniejszyła się o około 3 [%] (około 7 [Hz]). Wystąpienie tej zmiany wskazuje na

uszkodzenie układu i może być wykorzystane jako symptom diagnostyczny w algorytmie detekcji pęknięcia łopatek.



Rys. 8. WFP uszkodzonej łopaski



Rys. 9. WFP zarejestrowana akcelerometrem na łożysku

5.2. Algorytm oparty na modelu NARX

Kolejnym etapem prowadzonych badań było wykorzystanie algorytmu diagnostycznego opartego na modelu NARX. Do estymacji parametrów tego modelu zastosowano SSN. Sygnałem wejściowym do sieci neuronowej był sygnał znacznika fazy. Jako sygnały pomiarowe wybrano sygnał zarejestrowany przez wiroprowodowy czujnik przemieszczeń oraz akcelerometr piezoelektryczny umieszczony na obudowie łożyska. Oba czujniki umieszczone były po stronie napędu i mierzyły przebiegi czasowe w kierunku pionowym. Zarejestrowane przebiegi czasowe zostały podzielone na osobne zbiory po 1000 próbek każdy. Takie zbiory danych zostały przygotowane dla każdego ze stanów maszyny: sprawnego i z uszkodzoną łopatką (osobno dla akcelerometrów i czujników wiroprowodowych). W celu określenia optymalnej struktury sztucznej sieci neuronowej przeprowadzono zbiór procedur optymalizacji jej parametrów. Początkowa SSN miała 5 wejść i wyjść, w warstwie ukrytej znajdowało się 5 neuronów. Wszystkie neurony w warstwie ukrytej miały funkcję aktywacji typu „tangens”, pojedynczy neuron w warstwie wyjściowej miał liniową funkcję aktywacji. Po przeprowadzonym procesie optymalizacji końcowa struktura SSN składała się z 2 wejść i wyjść oraz 5 neuronów w warstwie ukrytej. Po dobraniu struktury SSN przystąpiono do uczenia czterech sieci (dwóch dla akcelerometrów oraz dwóch dla czujników przemieszczeń) dla dwóch różnych

stanów obiektu – zdadnego oraz obiekt z uszkodzoną łopatką. Te sieci zostały następnie wykorzystane jako sieci referencyjne. Celem prowadzonych badań było sprawdzenie czy istnieje możliwość sklasyfikowania stanu monitorowanego obiektu na podstawie danych przekazywanych do sieci neuronowej. W celu weryfikacji tej idei przygotowano cztery zbiory danych (każdy składający się z 2000 próbek) i wprowadzono je na wejście referencyjnej sztucznej sieci neuronowej. Jako miarę błędu klasyfikacji wybrano sumę błędów kwadratowych (NSSE). W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano 4 wartości NSEE. W tabeli 1 przedstawiono wyniki dla czujników przyspieszeń, w tabeli 2 – dla wiroprądowych czujników przemieszczeń.

Tabela 1. Wyniki uzyskane metodą NARX (akcelerometri)

Dane \ SSN	Obiekt zdadny	Pęknięta łopatką
Obiekt sprawny	11.00	12.60
Pęknięta łopatką	12.42	11.00

Tabela 2. Wyniki uzyskane metodą NARX (wiroprądowe czujniki przemieszczeń)

Dane \ SSN	Obiekt zdadny	Pęknięta łopatką
Obiekt sprawny	1.95	2.03
Pęknięta łopatką	85.05	4.69

6. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone badania pokazały, że zarówno metoda OMAX jak i modele NARX mogą być wykorzystywane w diagnostyce maszyn wirnikowych. Wykorzystanie tych metod daje możliwość monitorowania stanu maszyn w trybie on-line. W takim wypadku jako wymuszenie w metodzie OMAX szczególnie przydatne jest zastosowanie aktywne łożysko magnetyczne jako źródło zewnętrznego mierzalnego wymuszenia. Proponowane podejście do diagnostyki urządzeń znacznie zmniejsza koszt ich eksploatacji – daje możliwość wykonania eksperymentu diagnostycznego bez konieczności przerywania pracy obiektu (w przypadku metody OMAX) oraz umożliwia planowanie remontów na podstawie rzeczywistego stanu obiektu (monitorowanie stanu maszyny on-line z wykorzystaniem modeli NARX oraz metody OMA).

PODZIĘKOWANIA

Praca naukowa częściowo finansowana ze środków na naukę w latach 2006 – 2008 jako projekt badawczy nr 4T07B00430 oraz częściowo finansowana przez firmę ALSTOM Power Ltd.

LITERATURA

- [1]. Cempel C., Natke H. G.: *Model -Aided Diagnosis of Mechanical Systems: Fundamentals, Detection, Localization, Assessment.*, Springer-Verlag, Berlin, 1997.
- [2]. Iwaniec J., Bednarz J., Uhl T., Barszcz T.: *Model Based Diagnostics of Rotating Machinery*, Proceedings of the International Symposium on Stability Control of Rotating Machinery (ISCORMA-4), Calgary, Canada, 27 – 31 August 2007.
- [3]. Cauberghe B.: *Applied frequency – domain system identification in the field of experimental and operational modal analysis*. PhD Thesis, VUB, Brussel, 2004.
- [4]. Norgaard M., Ravn O., Poulsen N. K., Hansen L. K.: *Neural network for modeling and control of dynamic systems*. Springer-Verlag, London, 2000.
- [5]. Bednarz J., Barszcz T., Uhl T.: *Rotating machinery diagnostics based on NARX models*, CAMES: Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, V. 14, No. 4, pp. 557-567, 2007.



Mgr inż. **Jarosław BEDNARZ** jest doktorantem w Katedrze Robotyki i Mechatroniki AGH. Jego prace badawcze skupiają się na zastosowaniu analizy modalnej oraz modeli nieliniowych NARX w diagnostyce maszyn. Jest współautorem kilku prac

z tego zakresu.



Dr inż. **Tomasz BARSZCZ** jest adiunktem w Katedrze Robotyki i Mechatroniki AGH. Obszarem jego zainteresowania jest konstrukcja i zastosowania układów monitorowania stanu maszyn. Jest autorem monografii o systemach monitorowania i diagnostyki, wielu artykułów o charakterze naukowym oraz wielu wdrożeń w przemyśle.



Prof. dr hab. inż. **Tadeusz UHL** jest kierownikiem Katedry Robotyki i Mechatroniki AGH. W swoich pracach zajmuje się zagadnieniami dynamiki konstrukcji, a zwłaszcza analizą modalną. Jego zainteresowania obejmują także układy aktywnej redukcji drgań, układy sterowania i szeroko pojętą mechatronikę. Jest autorem 15 książek i kilkuset artykułów dotyczących wspomnianych zagadnień.