

## DIAGNOSTYKA MASZYN WIRNIKOWYCH OPARTA NA MODELU

Jarosław BEDNARZ\*, Tadeusz UHL\*, Adam PIŁAT\*\*

\* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki,  
Katedra Robotyki i Mechatroniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,  
[bednarz@agh.edu.pl](mailto:bednarz@agh.edu.pl), [tuhl@agh.edu.pl](mailto:tuhl@agh.edu.pl)

\*\* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki,  
Katedra Automatyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,  
[ap@agh.edu.pl](mailto:ap@agh.edu.pl)

### Streszczenie

Jednym z poważnych uszkodzeń występujących w turbogeneratorach jest zmęczeniowe pękanie łopatek. W pracy przedstawiony jest proponowany algorytm diagnostyczny oparty na metodzie OMA i OMAX oraz modelach NARX umożliwiający detekcję pęknięcia łopatek oraz jego eksperymentalna weryfikacja na stanowisku laboratoryjnym AGH. W pracy zaprezentowano również zastosowanie wzбудnika elektromagnetycznego jako mierzalnego wymuszenia w metodzie OMAX i EMA.

Słowa kluczowe: analiza modalna, model NARX, diagnostyka maszyn wirnikowych, wzbudnik elektromagnetyczny.

### MODEL BASED DIAGNOSTICS OF ROTATING MACHINERY

#### Summary

Paper concerns detection and identification of turbine blade cracking by means of the modal analysis method and NARX model based damage detection technique. In the paper there is presented the algorithm of the NARX method and modal model based diagnostic process, method applicability to structural health monitoring of rotating machinery as well as method experimental verification carried out for data measured on the laboratory test stand. The idea of using an electromagnetic exciter as measurable excitation in OMAX method is also presented.

Keywords: modal analysis, NARX models, rotating machinery diagnostics, electromagnetic exciter.

## 1. WPROWADZENIE

Coraz większą rolę w diagnostyce maszyn i urządzeń odgrywa podejście wykorzystujące model monitorowanego obiektu lub model sygnału drganiowego pochodzącego z monitorowanego obiektu [18]. Takie podejście umożliwia bardziej dokładną identyfikację uszkodzenia, daje także możliwość jego lokalizacji. W ramach projektu prowadzonego w Katedrze Robotyki i Mechatroniki AGH testowane są metody diagnostyczne wykorzystujące model modalny układu mechanicznego zbudowany z wykorzystaniem Eksploatacyjnej Analizy Modalnej z Mierzalnymi Wejściami (OMAX – z ang. Operational Modal Analysis with eXogenous Inputs) oraz model sygnałów zbudowany w oparciu o nieliniowy model ARX (NARX – Nonlinear AutoRegressive with eXogenous Inputs). W pracy zostaną zaprezentowane podstawy diagnostyki łopatek wirników z wykorzystaniem tych dwóch metod, wyniki ich testowania oraz zaprezentowane zostanie stanowisko badawcze służące do ich testowania. W pracy zaproponowane zostanie również

wykorzystanie specjalizowanego wzbudnika elektro - magnetycznego jako zewnętrznego mierzalnego źródła wymuszenia w metodzie OMAX.

## 2. METODA OMAX

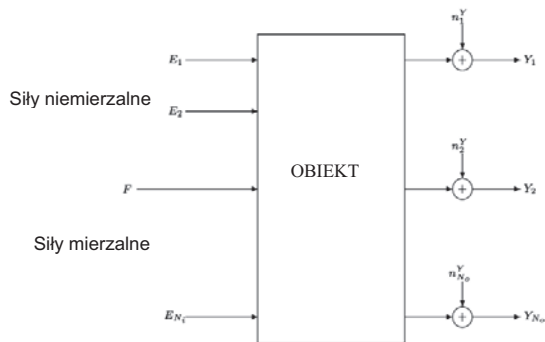
Eksploatacyjna Analiza Modalna z Mierzalnymi Wejściami (OMAX) zakłada, że drgania każdego obiektu wymuszane są zarówno przez siły mierzalne jak i niemierzalne [8, 9]. Dlatego też w tej metodzie odpowiedź układu jest rozpatrywana jako złożenie dwóch komponentów: deterministycznego wymuszanego przez siły mierzalne oraz stochastycznego wymuszanego przez siły niemierzalne (rys. 1).

W celu wyznaczenia odpowiedzi takiego układu mogą zostać wykorzystane równania w postaci dyskretnej:

$$\begin{aligned} z_k X_k &= AX_k + BF_k + W_k \\ Y_k &= CX_k + DF_k + V_k \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

$X_k, Y_k, F_k$  – wektor stanu, wejścia i wyjścia,  
 $A, B, C, D$  – macierz stanu, wejścia, wyjścia oraz sterowań,  
 $W_k, V_k$  – biały szum (wymuszenie eksploatacyjne).



Rys. 1. Schemat obiektu z przyłożonymi siłami mierzalnymi i niemierzalnymi

Dla równania (1) relacja wejście – wyjście może zostać napisana w następującej postaci:

$$Y_k = [C(Iz_k - A)^{-1}B + D]F_k + C(Iz_k - A)^{-1}W_k + V_k \quad (2)$$

Pierwszy wyraz równania (2) opisuje wpływ deterministycznego (mierzalnego) wymuszenia na odpowiedź układu natomiast drugi – wpływ stochastycznego wymuszenia. W rezultacie zarówno deterministyczna jak i stochastyczna część zawiera informacje o dynamice systemu (wyrażenie  $(Iz_k - A)$ ). Na tej podstawie sformułowane zostało kilka metod identyfikacji w oparciu o metodę OMAX [3, 4, 5]. W celu wyznaczenia parametrów modalnych w metodzie OMAX wykorzystuje się zależność 3 [4]:

$$\begin{bmatrix} H^m(\omega_k) & S_{yy}^+(\omega_k) \end{bmatrix} = \sum_{r=1}^m \left( \frac{\varphi_r Q_r^T}{1 - \lambda_r z_k} + \frac{\varphi_r^* Q_r^{*T}}{1 - \lambda_r^* z_k} \right) \quad (3)$$

Jeżeli siły mierzalne (deterministyczna część metody OMAX) oraz całkowita odpowiedź układu są znane równanie (2) można przekształcić do następującej postaci:

$$Y_{o,b}(\omega_k) = \frac{B_{oi}(z_k)}{A(z_k)} F_b(\omega_k) + \frac{T_{o,b}(z_k)}{A(z_k)} + \frac{C_o(z_k)}{A(z_k)} E_{o,b}(\omega_k) \quad (4)$$

Gdzie  $Y_{o,b}$  i  $F_b$  są widmami DFT sygnałów wejściowych oraz wyjściowych,  $E_{o,b}$  jest nieznanym białym szumem (wymuszeniem eksploatacyjnym),  $B_{oi}$  - licznik wielomianu,  $A(z_k)$  jest wielomianem wspólnego mianownika, natomiast  $T_{o,b}$  wielomianem procesów przejściowych wyjścia. Można łatwo zauważyć, że każda część równania (4) zawiera wielomian  $A(z_k)$ , który opisuje dynamikę systemu, ale w praktyce wyznaczone z tego równania bieguny układu (pierwiastki równania

charakterystycznego  $A(z_k)=0$ ) wymuszane są w różny sposób (są różne w różnych członach równania (4)). W celu wyznaczenia parametrów modelu błąd predykcji powinien być minimalizowany, co prowadzi do zastosowania następującej funkcji (podejście CLSF):

$$I_{IO}^{CLSF}(\Theta) = \sum_{o=1}^{N_o} \sum_{b=1}^{N_b} \sum_{k=1}^{N_f} |E_{o,b}(\omega_k)|^2 \quad (5)$$

gdzie:

$$E_{o,b}(\omega_k) = \frac{B_{oi}(z_k)F_b(\omega_k) - A(z_k)Y_{o,b}(\omega_k) - T_{o,b}(z_k)}{C_o(z_k)}$$

W trakcie estymacji parametrów modalnych stabilność numeryczna powinna być bardzo dokładnie sprawdzana [2, 3]. Dla systemów zmiennych w czasie równanie (4) można przekształcić do następującej postaci:

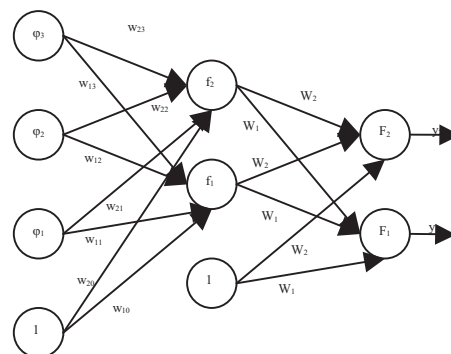
$$Y_{o,b}(\omega_k, i) = \frac{B_{oi}(z_k, i)}{A(z_k, i)} F_b(\omega_k, i) + \frac{T_{o,b}(z_k, i)}{A(z_k, i)} + \frac{C_o(z_k, i)}{A(z_k, i)} E_{o,b}(\omega_k, i) \quad (6)$$

gdzie:  $i$  – dyskretny indeks czasu.

W celu identyfikacji systemu z równania (6) można zastosować metodę rekurencyjną [1] i na tej podstawie wyznaczyć częstotliwości drgań własnych oraz współczynniki tłumienia modalnego obiektu.

### 3. MODEL NARX

Najbardziej podstawowymi strukturami modeli typu „czarna skrzynka” są modele neuronowe opisujące relacje wejścia – wyjścia. Najczęściej wykorzystywaną architekturą sieci neuronowych jest struktura oparta o wielowarstwowy perceptron (MLP – z ang. multi-layer perceptron). Przykład sieci złożonej z dwóch warstw MLP przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Struktura dwuwarstwowej sieci MLP

Zalecane jest, aby przed rozpoczęciem procesu modelowania obiektów posiadać wiedzę a priori na temat ich struktury oraz nieliniowości. Sieć neuronowa jest zbiorem parametrów zwanych wagami oraz składową stałą (ang. Bias). Do tej pory

zdefiniowano wiele rodzajów struktur sieci neuronowych [6].

W ogólnym przypadku architektura sieci neuronowej może być opisana następującym równaniem (7):

$$\hat{y}(t) = g[\varphi, \theta] = F_i \left[ \sum_{j=1}^{nH} W_{i,j} f_j \left( \sum_{l=1}^{n\Gamma} w_{j,l} \varphi_l + w_{j,0} \right) + W_{i,0} \right] \quad (7)$$

Predyktor  $\hat{y}(t) = g[\varphi, \theta]$  zawiera w sobie poprzednie wyjścia i/lub poprzednie wejścia oraz przewidywane

wyjście  $\hat{y}(t)$  gdzie  $\theta$  oznacza wektor parametrów, który zawiera wszystkie dobierane parametry sieci. Zazwyczaj wykorzystuje się sigmoidalne/tangens hiperboliczne funkcje aktywacyjne w warstwie ukrytej sieci, w warstwie wyjściowej wykorzystuje się natomiast funkcje liniowe. W trakcie badań rozważono sieć opisaną równaniem (7). Wagi sieci ( $\theta$ ,  $w$  oraz  $W$ ) zostały dobrane na podstawie procesu treningu sieci z wykorzystaniem zestawu danych wejściowych i wyjściowych zebranych w zbiór uczący. Jako kryterium uczące przyjęto najmniejszy błąd średniokwadratowy pomiędzy zadaniem a przewidzianym wyjściem systemu. Minimalizowany błąd predykcji opisany jest równaniem:

$$BP = \frac{1}{2N} \sum_{r=1}^N \left[ y(t) - \hat{y}(t|\theta) \right]^T \left[ y(t) - \hat{y}(t|\theta) \right] \quad (8)$$

Wagi sieci zostały ustalone na podstawie algorytmu uczącego. Jednym z podstawowych algorytmów uczących jest algorytm oparty na wstecznej propagacji. Szczegółowy opis tego algorytmu można znaleźć np. w [6].

Wielowarstwowy perceptron, zastosowany przez Autorów, opisany w pracy [7], może być zastosowany do identyfikacji lub modelowania nieliniowych systemów dynamicznych. Struktura, która została wybrana do zastosowania w pracy jest znana jako nieliniowy model ARX (NARX) [21]:

$$y(t) = \sum_{m=1}^M y_m(t) \quad (9)$$

$$y_m(t) = \sum_{p=0}^m \sum_{k_1, k_{p+q}=1}^K c_{p,q}(k_1, \dots, k_{p+q}) \times \prod_{i=1}^p y(t-k_i) \prod_{i=p+1}^{p+q} u(t-k_i) \quad (10)$$

gdzie:  $y_m(t)$  - wyjście modelu  $m$ -tego rzędu,

$$p+q = m, k_i = 1, \dots, K, \sum_{k_1, k_{p+q}=1}^K (\cdot) = \sum_{k_1=1}^K (\cdot) \cdots \sum_{k_{p+q}=1}^K (\cdot)$$

Dla takiej struktury można zdefiniować wektor regresji (11) oraz predyktor (12) jako:

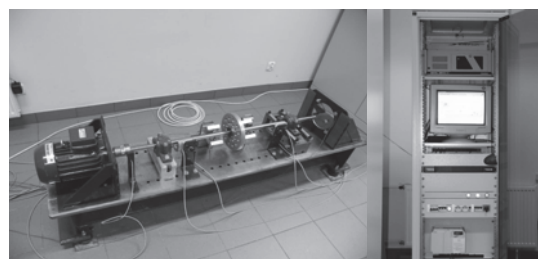
$$\varphi(t) = [y(t-1) \dots y(t-n_a) u(t-n_k) \dots u(t-n_b-n_k+1)]^T \quad (11)$$

$$\hat{y}(t|\theta) = y(t|t-1, \theta) = g(\varphi(t), \theta) \quad (12)$$

Po poprawnie przeprowadzonym procesie uczenia sieć neuronowa jest zdolna symulować modelowany układ.

#### 4. STANOWISKO LABORATORYJNE

Stanowisko laboratoryjne (rys. 3) zostało zaprojektowane i wykonane w Katedrze Robotyki i Mechatroniki AGH. Stanowisko wykorzystywane jest głównie do symulowania niesprawności maszyn wirnikowych. Ponadto wykorzystywane jest ono w badaniach dotyczących eksploatacyjnej analizy modalnej, diagnostyki opartej na modelach NARX oraz służy również do testowania układów automatycznego wyważania.



Rys. 3. Stanowisko laboratoryjne

Układ łożyska/ wirnik jest zamontowany na ciężkiej płycie stalowej. Wirnik jest napędzany silnikiem prądu przemiennego, który umożliwia osiągnięcie prędkości obrotowej wałka do 3000 [obr./min]. Silnik zasilany jest poprzez falownik, który umożliwia sterowanie prędkością obrotową oraz szybkością rozbiegu i wybiegu maszyny, co daje możliwość analizowania procesów przejściowych układu. Stanowisko wyposażone jest w wymienne łożyska, toczne i ślizgowe. Jeden ze stojaków łożyskowych ma możliwość wprowadzenia regulowanego rozosiniowania układu. Na wirniku można osadzić do czterech tarcz, w których można wprowadzać niewyważenie, zarówno statyczne, jak i dynamiczne. Stanowisko jest wyposażone w regulowaną śrubę do symulowania przytarć. Uzupełnieniem części mechanicznej jest specjalizowany układ pomiarowy oparty na komponentach firmy National Instruments. Układ pomiarowy składa się z następujących elementów:

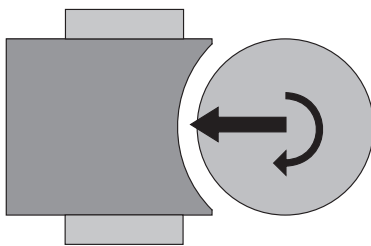
- znacznika fazy (czujnik wiropądowy),
- ośmiu wiropądowych czujników przemieszczeń,
- dwóch trójosiowych akcelerometrów,
- karty pomiarowej NI PCI-6034E,
- oprogramowania LabView.

Dodatkowo układ umożliwia wykonywanie pomiarów za pomocą zewnętrznego sprzętu np. analizatora SCADAS III lub rejestratora TEAC. Istnieje również możliwość wzbudzenia drgań

stanowiska z wykorzystaniem wzbudnika elektromagnetycznego, co umożliwia testowanie metody EMA oraz OMAX.

## 5. WZBUDNIK ELEKTROMAGNETYCZNY

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. 4. Zaprojektowany elektromagnes

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 300N. 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 z zadaną wartością progową steruje pracą mostka. Kontroler sprzętowy pozwala na szybką i precyzyjną zmianę wartości natężenia prądu płynącego w cewce.

W celu wykonania serii badań eksperymentalnych z wykorzystaniem wzbudnika kontroler sprzętowy został połączony z komputerem wyposażonym w konwerter D/A sterowanym z poziomu oprogramowania MATLAB/Simulink. Wymagana charakterystyka prądu była generowana za pomocą modelu stworzonego przez użytkownika w oprogramowaniu Simulink i realizowana była w czasie rzeczywistym. Sygnał sterujący był przesyłany za pomocą karty D/A bezpośrednio na napięciowe wejście referencyjne. Z wykorzystaniem procedury sprzętowego szybkiego prototypowania

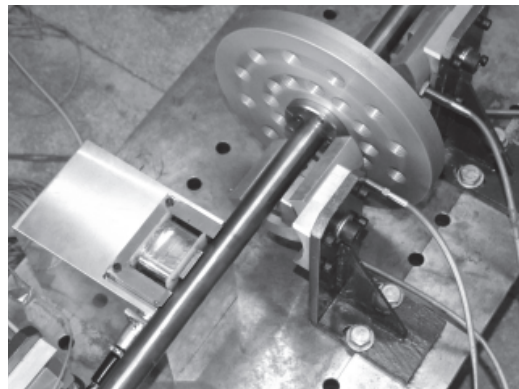
przeprowadzono serię wielu eksperymentów. Jako sygnał sterujący wykorzystano przebieg czasowy natężenia prądu o charakterystyce sinusoidalnej, sygnały typu “chirp” oraz szum biały. Pomiar wykonano z wykorzystaniem wiropędowych czujników przemieszczeń (Rys. 5).

W celu realizacji zadań sterowania cyfrowego sterownik siłownika elektromagnetycznego został dostosowany do podłączenia go do komputera klasy PC. Sygnałem sterującym jest napięcie odniesienia odpowiadające zadanej wartości prądu.

W celu przeprowadzenia eksperymentów diagnostycznych zastosowano kartę sterująco-pomiarową wyposażoną w przetworniki 12 bitowe analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe. Karta ta zapewnia konwersję sygnału analogowego w czasie 8 mikrosekund i dokładność 0.01%.

Postaci sił generowanych przez siłownik elektromagnetyczny były generowane w zintegrowanym jednokomputerowym środowisku programowo-sprzętowym [19, 20]. Wykorzystuje ono nowoczesne narzędzia programowo-sprzętowe służące do modelowania, symulacji i szybkiego prototypowania złożonych algorytmów sterowania i diagnozowania. Środowisko to zostało skonfigurowane z użyciem:

- komputera klasy IBM-PC wyposażonego w kartę sterująco-pomiarową,
- systemu operacyjnego Windows 98/NT/2000,
- oprogramowania MATLAB/Simulink v.5.3 do projektowania układów sterowania,
- przyborników programu MATLAB: RTW (Real Time Workshop) i RTWT (Real Time Windows Target),
- kompilatora języka C WATCOM v.11.0.



Rys. 5. Wzbudnik elektromagnetyczny

## 6. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

W ramach pracy przedstawiono wyniki eksperymentów identyfikacyjnych przeprowadzonych za pomocą metod: OMA, OMAX oraz wykorzystując model NARX.



### 6.1. Porównanie metody OMA i OMAX

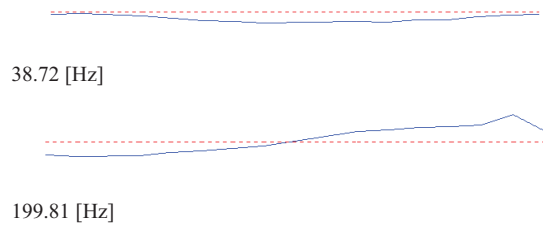
W celu zademonstrowania różnic pomiędzy OMA oraz metodą OMAX wykonany został eksperyment na obiekcie laboratoryjnym przedstawionym na rys. 3. W trakcie przeprowadzania eksperymentu wałek obracał się z częstotliwością 25 [Hz], pomiary wykonano z wykorzystaniem oprogramowania LabVIEW (mierzone wartości było przemieszczenie względne wałka), otrzymane wyniki wyznaczono za pomocą oprogramowania Vioma, które jest przybornikiem narzędziowym do programu Matlab i służy do przeprowadzanie estymacji parametrów modalnych.

W pierwszym etapie eksperymentu przeprowadzono eksploatacyjną analizę modalną (OMA – Operational Modal Analysis) dla czterech punktów pomiarowych na wale, w drugim etapie zastosowano metodę OMAX z wymuszeniem sygnałem typu „szum biały” generowanym za pomocą zaprojektowanego wzbudnika elektromagnetycznego. Dla OMA zmierzone zostały czasowe przebiegi drgań i na ich podstawie wyznaczono bieguny układu oraz diagram stabilizacyjny. W metodzie OMAX zarejestrowane zostały zarówno przebiegi czasowe jak i widmowe funkcje przejścia (WFP) i na tej podstawie również wyznaczono bieguny oraz diagram stabilizacyjny [22] układu. Na rysunku 6 przedstawiono wybrane postacie drgań własnych wału. Na rys. 7 przedstawiono wykresy diagramów stabilizacyjnych, a w tabeli 1 wyznaczone częstotliwości drgań własnych (CDW) i współczynniki tłumienia modalnego (WTM).

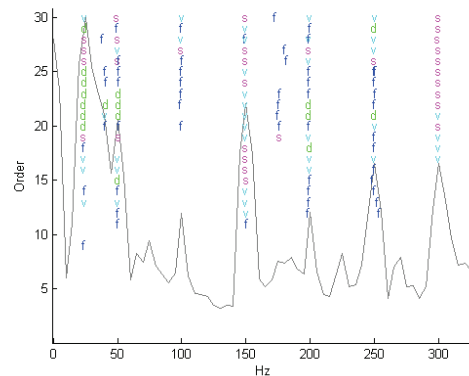
Analizując otrzymane wyniki można zauważyć, że zastosowanie metody OMAX umożliwiło wykrycie dodatkowego bieguna układu. Dodatkowo można zauważyć, że bieguny układu stabilizują się szybciej w przypadku stosowania metody OMAX niż klasycznej OAM. Na tej podstawie można stwierdzić, że metoda OMAX umożliwia pełniejszą i bardziej dokładną identyfikację układów mechanicznych.

Tabela 1. Wyznaczone bieguny układu

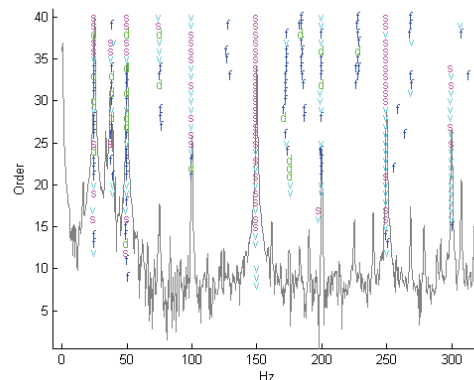
Lp.	OMA		OMAX	
	CDW [Hz]	WTM [%]	CDW [Hz]	WTM [%]
1	24.80	8.51	24.88	0.78
2	24.88	8.72	24.89	0.59
3	-	-	38.72	2.97
4	-	-	49.91	0.31
5	50.86	4.19	49.97	0.33
6	149.76	1.34	149.94	0.1
7	199.02	0.93	199.81	0.22
8	249.94	0.63	249.92	0.06
9	299.61	0.88	300.07	0.31



Rys. 6. Postacie drgań własnych badanego wału



a) metoda OMA



b) metoda OMAX

Rys. 7. Diagramy stabilizacyjne uzyskane różnymi metodami

### 6.2. Wykrywanie uszkodzeń maszyn wirnikowych z wykorzystaniem metody OMAX

W celu przetestowania możliwości zastosowania metody OMAX do diagnostyki maszyn wirnikowych przeprowadzono serię pomiarów na stanowisku laboratoryjnym. W trakcie pomiarów wprowadzono w układzie uszkodzenia w postaci luzów posadowienia ich obudów od strony czynnej i biernej. Pomiary wykonano z wykorzystaniem akcelerometrów piezoelektrycznych umieszczonych na łożyskach. Wzbudnik elektromagnetyczny wykorzystano jako źródło zewnętrznego mierzalnego wymuszenia. W trakcie eksperymentu rejestrowano zarówno przebiegi czasowe amplitudy przyspieszeń drgań jak i widmowe funkcje przejścia układu. Na podstawie pomiarów wyznaczono parametry modalne układu. Analizy

przeprowadzono dla trzech stanów dynamicznych obiektu:

- obiekt sprawny,
- obiekt z luzem posadowienia łożyska po stronie czynnej,
- obiekt z luzem posadowienia łożyska po stronie biernej.

Wartości częstotliwości drgań własnych układu (CDW) oraz współczynników tłumienia modalnego (WTM) dla trzech różnych stanów dynamicznych stanowiska przedstawiono w tabelach 2, 3 oraz 4.

Tabela 2. Wyznaczone bieguny układu sprawnego

Lp.	CDW [Hz]	WTM [%]
1	22.24	6.24
2	39.93	0.02
3	57.77	3.61
4	73.96	4.79
5	79.91	0.07
6	144.23	0.73
7	144.07	0.71
8	147.52	2.03
9	159.89	0.03
10	183.76	0.55

Tabela 3. Wyznaczone bieguny układu z wprowadzonymi luzami posadowienia łożysk od strony czynnej

Lp.	CDW [Hz]	WTM [%]
1	22.89	7.30
2	39.97	0.02
3	39.95	0.01
4	57.52	4.46
5	59.50	1.96
6	73.79	4.24
7	80.05	0.07
8	108.36	2.45
9	143.40	0.74
10	143.68	0.64
11	159.91	0.04
12	185.03	0.81

Tabela 4. Wyznaczone bieguny układu z wprowadzonymi luzami posadowienia łożysk od strony biernej

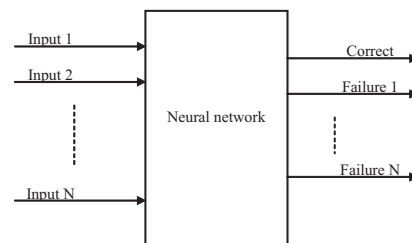
Lp.	CDW [Hz]	WTM [%]
1	22.92	7.22
2	39.92	0.02
3	57.93	4.22
4	59.91	1.60
5	73.52	4.55
6	79.95	0.01
7	108.37	2.45
8	143.54	0.71
9	143.54	0.74
10	147.47	1.41
11	159.86	0.01
12	185.03	0.82

Przeprowadzone analizy pokazują, że metoda OMAX umożliwia wykrycie uszkodzenia występującego w badanym układzie. Można łatwo

zauważyć, że wprowadzona niesprawność układu zmienia zarówno częstotliwości drgań własnych jak i współczynniki tłumienia modalnego układu. Ponadto można zauważyć, że w układzie pojawiają się nowe postacie drgań własnych. Różnice można zauważyć nie tylko pomiędzy stanem poprawnym maszyny i układem z niesprawnością, ale także pomiędzy układami z wprowadzonymi różnymi uszkodzeniami. Występowanie takich różnic można zauważyć nie tylko w przypadku różnych uszkodzeń, ale także w przypadku tego samego typu uszkodzenia różniącego się miejscem wystąpienia (tabela 3 i 4). Dotychczasowe prace prowadzone nad metodą OMAX pokazują, że metoda ta umożliwia nie tylko wykrycie niesprawności układu, ale także miejsce jego wystąpienia. Cecha ta umożliwia szybszą naprawę uszkodzenia, co ma znaczny wpływ na koszty eksploatacji maszyn – daje możliwość skrócenia czasu remontu.

### 6.3. Wykrywanie uszkodzeń maszyn wirnikowych z wykorzystaniem modeli NARX

W ostatnim czasie prowadzone jest wiele badań nad zastosowaniem sieci neuronowych w modelowaniu i diagnostyce maszyn wirnikowych [12, 13, 14, 15, 16, 17]. Popularnym podejściem jest stosowanie sieci neuronowych do klasyfikacji stanu dynamicznego maszyn. Schematycznie proces ten przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Klasyfikacja za pomocą sieci neuronowych

W trakcie prowadzonych przez autorów badań nad wykorzystaniem modeli NARX do diagnostyki wykorzystano do analizy sygnałów jeden z przyborników narzędziowych Matlaba – Neural Network Based System Identification [11]. Autorzy przyjęli założenie o stałej prędkości obrotowej wału w trakcie pomiaru. Zmierzone na obiekcie dane zostały podzielone na osobne zbiory, z których każdy zawierał 1000 próbek. Takie zbiory zostały przygotowane dla każdego z mierzonych stanów: sprawnego, rozosiowania, niewyważenia oraz dwóch rodzajów luzów posadowienia łożysk (dla strony czynnej – DE oraz biernej – NDE).

Jako wejście do sieci neuronowej wykorzystano sygnał znacznika fazy. W trakcie badań przeanalizowano kilka rodzajów sieci neuronowych różniących się ilością i typem neuronów. Analizę rozpoczęto dla sieci z 10 wejściami i wyjściami oraz 10 neuronami w warstwie ukrytej. Wszystkie neurony w warstwie ukrytej posiadają funkcję aktywacji typu tangens hiperboliczny, pojedynczy

neuron w warstwie wyjściowej ma liniową funkcję aktywacji. Po przeprowadzonym procesie optymalizacji ostatecznie przyjęta struktura sieci składa się z 3 wejść i wyjść oraz zawiera 5 neuronów w warstwie ukrytej. Po dobraniu struktury SSN przystąpiono do uczenia trzech sieci dla trzech różnych stanów obiektu – sprawnego oraz dwóch typów luzów posadowienia łożysk. 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 tym celu przygotowano trzy zbiory testowe dla danych z obiektu sprawnego oraz z luzami łożyskowymi i wprowadzono je kolejno do każdej z sieci referencyjnych. Wyniki tych analiz przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Błędy predykcji referencyjnej sieci neuronowej dla trzech różnych pakietów danych testowych

Sieć referencyjna		OBIEKT		
		Sprawny	Luźne łożysko DE	Luźne łożysko NDE
Dane	Sprawny	1.32	3.52	1.77
	Luźne łożysko DE	5.12	2.29	2.87
	Luźne łożysko NDE	1.75	3.05	1.5

Jak można łatwo zauważyć istnieją różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi na podstawie danych z takiego stanu obiektu, dla którego sieć była uczona i danych z obiektu w innym stanie. Umożliwia to wykrycie uszkodzenia i jego ocenę. Problem, który można tutaj zauważyć występuje z danymi z obiektu z luźnym łożyskiem NDE. Różnica w błędzie predykcji dla sieci nauczonej dla danych z obiektu sprawnego wskazują, że luz wprowadzony do układu był niewielki, przez co istnieje możliwość jego niewykrycia przez sieć. Po przeprowadzonych testach zdecydowano się wykorzystać referencyjną sieć neuronową dla danych z obiektu sprawnego do sprawdzenia czy istnieje możliwość wykrycia za jej pomocą niewyważenia i nieosiowości występujących w badanym obiekcie. Wyniki tych analiz przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Błędy predykcji referencyjnej sieci neuronowej (dla obiektu sprawnego) dla trzech różnych pakietów danych testowych

Typ danych	Wartość błędu predykcji
Dane z obiektu sprawnego	1.44
Dane z obiektu z nieosiowością	7.86
Dane z obiektu z niewyważeniem	68.75

Wyniki pokazują, że również w przypadku nieosiowości i niewyważenia można zastosować model NARX do ich wykrycia. Bardzo duża wartość błędu predykcji dla niewyważonego układu ma związek ze zmianą charakteru sygnału drganiowego.

#### 6.4. Diagnostyka łopatek wirników

Kolejnym etapem prowadzonych badań było testowanie możliwości zastosowania analizy modalnej oraz modeli NARX w diagnostyce łopatek wirników. Stanowisko laboratoryjne zostało zmodyfikowane poprzez montaż wirnika z łopatkami, a następnie nacięto jedną z łopatek symulując w ten sposób uszkodzenie. (Rys. 9).



Rys. 9. Uszkodzona łopata

W badaniach opartych na modelach NARX wykorzystano następujące oprogramowanie do analizy i przetwarzania sygnałów: System Identification, Neural Network and Neural Network Based System Identification v. 2.0 [10]. Sygnałem wejściowym do sieci neuronowej był sygnał znacznika fazy. Jako sygnały pomiarowe wybrano sygnał zarejestrowany przez wiroprądowy 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 20000 próbek każdy. Takie zbiory danych zostały przygotowane dla każdego ze stanów maszyny: sprawnego i z uszkodzoną łopatką (osobno dla akcelerometrów i czujników wiroprądowych). W celu określenia optymalnej struktury sztucznej sieci neuronowej (SSN) przeprowadzono zbiór procedur optymalizacji jej parametrów. Początkowa SSN miała 10 wejść i wyjść, w warstwie ukrytej znajdowało się 10 neuronów. Wszystkie neurony w warstwie ukrytej miały funkcję aktywacji typu „tanges”, pojedynczy neuron w warstwie wyjściowej miał liniową funkcję aktywacji. Po przeprowadzonym procesie optymalizacji końcowa struktura SSN składała się z 3 wejść i wyjść oraz 5 neuronów w warstwie ukrytej. Po dobraniu struktury SSN przystąpiono do uczenia czterech sieci (dwóch dla akcelerometrów, 2 dla czujników przemieszczeń) dla dwóch różnych stanów obiektu – sprawnego oraz obiekt z uszkodzoną łopatką. Te sieci zostały następnie wykorzystane jako sieci referencyjne. Celem

prorowadzonych 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 35000 próbek) i wprowadzono je na wejście referencyjnej sztucznej sieci neuronowej. Jako miarę błędu klasyfikacji wybrano znormalizowaną sumę błędów średniokwadratowych (NSSE). W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano 4 wartości NSEE. W tabeli 7 przedstawiono wyniki dla czujników przyspieszeń, w tabeli 8 – dla wiroprowadowych czujników przemieszczeń.

Tabela 7. Wyniki uzyskane metodą NARX (akcelerometry)

Dane	Obiekt sprawny	Pęknięcie łopatk
SSN	11.00	12.60
Obiekt sprawny	11.00	12.60
Pęknięcie łopatk	12.42	11.0000

Tabela 8. Wyniki uzyskane metodą NARX (wiroprowadowe czujniki przemieszczeń)

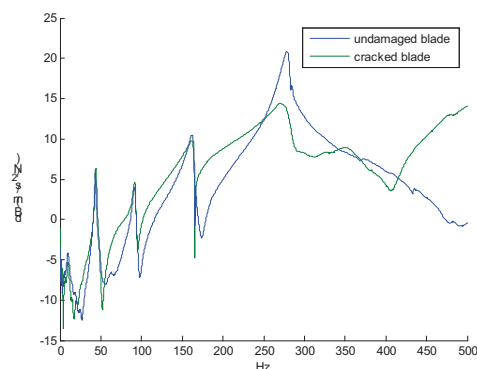
Dane	Obiekt sprawny	Pęknięcie łopatk
SSN	1.9555	2.0337
Obiekt sprawny	1.9555	2.0337
Pęknięcie łopatk	85.0570	4.6917

Analiza wyników zebranych w tabelach 7 i 8 pokazuje, że w przypadku wprowadzenia do SSN nauczonej rozpoznawania jednego ze stanów dynamicznych układu danych z innego stanu powoduje wzrost błędu predykcji. Wzrost wartości tego błędu wskazuje na możliwość wystąpienia uszkodzenia i może być wykorzystane jako symptom diagnostyczny.

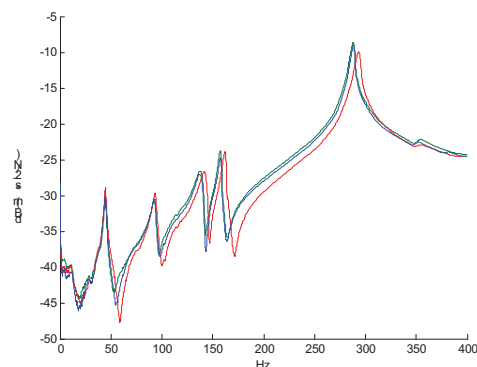
Kolejnym etapem badań testowanie metody OMAX do diagnostyki uszkodzeń wirników. W pierwszej części przeprowadzonych badań dokonano estymacji parametrów modalnych uszkodzonej i nieuszkodzonej łopatk. Widmowe funkcje przejścia (WFP) uszkodzonej i nieuszkodzonej łopatk przedstawione są na rysunku 10. W trakcie badań przeprowadzono również analizę wpływu montażu i demontażu badanych łopatek na wartości ich CDW i WTM. Rezultaty tych badań dla łopatk z uszkodzeniem przedstawione są na rysunku 11. Analiza wykresów widmowych funkcji przejścia przedstawionych na rysunku 11 pozwala stwierdzić, że proces montażu i demontażu łopatek z wału nie ma wpływu na ich wartości CDW.

Kolejnym krokiem było zastosowanie metody OMAX do detekcji pęknięcia łopatk. W trakcie pomiaru rejestrowane były zarówno przebiegi czasowe jak i WFP układu. Rezultaty tych badań przedstawione są w tabeli 9. W metodzie OMAX zastosowano algorytm BR do estymacji CDW oraz

WTM badanego obiektu. Jako zewnętrznego mierzalnego wymuszenia w metodzie OMAX użyto wymuszenia impulsowego z wykorzystaniem młotka modalnego.



Rys. 10. WFP łopatki nr 3



Rys. 11. WFP łopatki nr 3

Tabela 9. Wyniki uzyskane metodą OMAX

Lp.	Obiekt sprawny		Pęknięcie łopatk	
	CDW [Hz]	WTM [%]	CDW [Hz]	WTM [%]
1	28.83	0.40	28.84	0.49
2	28.88	0.86	28.75	0.37
3	34.49	0.95	---	---
4	39.28	0.51	---	---
5	42.63	0.68	42.96	1.13
6	44.29	0.09	---	---
7	86.70	0.22	86.92	0.52
8	86.73	0.22	---	---
9	91.60	1.80	---	---

Analiza wyników zebranych w tabeli 9 pokazuje, że zmiana stanu dynamicznego układu znajduje swoje odzwierciedlenie w wartościach parametrów modalnych badanego układu mechanicznego. Zmiany te wskazują na prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia w układzie i mogą być wykorzystane jako symptom diagnostyczny.

### 6.5. Diagnostyka łopatek wirników z wykorzystaniem metody OMAX oraz wzbudnika elektromagnetycznego

Kolejnym etapem badań prowadzonych przez autorów było zastosowanie zaprojektowanego

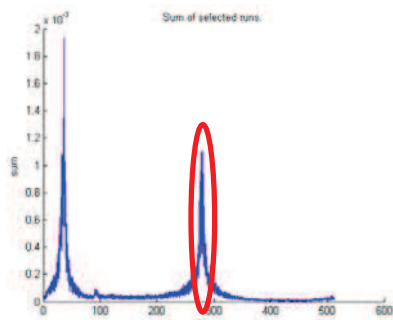


wzbudnika elektromagnetycznego do diagnostyki pęknięcia łopatek. Idea algorytmu diagnostycznego opierała się na wymuszaniu drgań łopatek z częstotliwością równą pierwszej częstotliwości drgań własnych badanych łopatek w czasie ruchu wirnika. Eksperyment przeprowadzono w następujących etapach:

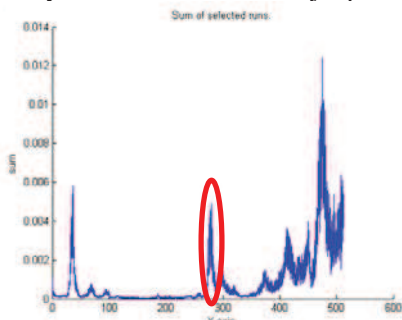
- wyznaczenie pierwszej CDW łopatki,
- wymuszenie układu sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości pierwszej CDW badanych łopatek,
- pomiar przyspieszeń drgań na łożyskach,
- estymacja parametrów modalnych badanego układu.

Na rys. 12 i 13 przedstawiono charakter zarejestrowanych WFP na łopacie 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 parametrów modalnych 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. 12. WFP uszkodzonej łopatki



Rys. 13. WFP zarejestrowana akcelerometrem na łożysku

## 7. PODSUMOWANIE

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. Niewątpliwą zaletą modeli NARX jest możliwość ich wykorzystania w procedurze planowania remontów. Wartość błędu predykcji wzrasta wraz ze wzrostem poziomu uszkodzenia, co daje możliwość oszacowania dopuszczalnego czasu pracy danego urządzenia. Wyniki prowadzonych prac wskazują na celowość ich dalszego kontynuowania. W kolejnych etapach prac zostanie podjęta próba zastosowania metody OMAX dla nieliniowości. W przypadku modeli NARX planowane jest wykorzystanie sieci neuronowych, do których wprowadzane będą dane ze wszystkich kanałów drganiowych, a nie tylko z jednego wybranego na podstawie subiektywnej oceny operatora systemu diagnostycznego. Proponowane podejście do diagnostyki urządzeń znacznie zmniejsza koszt ich eksploatacji – daje możliwość wykonania eksperymentu diagnostycznego bez konieczności przerywania pracy obiekt (w przypadku metody OMAX) oraz umożliwia planowanie remontów na podstawie rzeczywistego stanu obiektu (monitorowanie stanu maszyny on-line z wykorzystaniem modeli NARX).

## PODZIĘKOWANIE

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006 – 2008 jako projekt badawczy nr 4T07B00430.

## LITERATURA

- [1] Uhl T., Bogacz M.: *Real time modal analysis and its application for damage detection*, Proc. of ISMA2004, str.1066-1076, Leuven, 2004.
- [2] Pintelton R., Schoukens J.: *System Identification; A frequency domain approach*, IEEE Press, 2001.
- [3] Cauberghe B., Guillaume P., Verboven P., Parloo E.: *Modal Analysis in presence of unmeasured forces and transient effects*. Journal of Sound and Vibration, vol. 265 str. 609-625, 2003.
- [4] Cauberghe B.: *Applied frequency – domain system identification in the field of experimental and operational modal analysis*. Praca doktorska, VUB, Brussel, 2004.
- [5] Iwaniec J., Uhl T.: *Application of the nonlinear LSCF method to the estimation of modal model parameters*, Machine Dynamic Problems, vol. 27, nr.2, str. 37-54, 2003.

- [6] Korbicz, J., Obuchowicz, A., Uciński, D.: *Sztuczne sieci neuronowe*. Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa, 1994.
- [7] Norgaard M., Ravn O., Poulsen N. K., Hansen L. K.: *Neural network for modeling and control of dynamic systems*. Springer-Verlag, Londyn, 2000.
- [8] Bednarz J., Uhl T.: *Metoda OMAX w identyfikacji układów mechanicznych. Wybrane zagadnienia analizy modalnej konstrukcji mechanicznych* (red. Uhl T.), str. 15-20, Wydawnictwo ITE, Kraków 2005.
- [9] Uhl T., Barszcz T., Bednarz J.: *Model Based SHM – Rotating Machinery Application*. Trans Tech Publications, Proceedings of the 6th Conference on Damage Assessment of Structures, str. 459-466, Gdańsk, 2005.
- [10] Barszcz T., Uhl T., Bednarz J.: *Nonlinear System Identification in Diagnostics of Rotating Machinery.*, 7th IFToMM-Conference on Rotor Dynamics, Vienna, Austria, 25-28 September 2006,
- [11] Norgaard M: *Neural Network Based System Identification Toolbox*,” Tech. Report. 00-E-891, Department of Automation, Technical University of Denmark, 2000.
- [12] Chen Ch., Mo Ch.: *A method for intelligent fault diagnosis of rotating machinery*. Digital Signal Processing v. 14, pp. 203-217, 2004.
- [13] Koscielny, J. M.: *Diagnostyka procesów przemysłowych*. EXIT, Warsaw, 2001.
- [14] Nalinaksh S. Vyas , D. Satishkumar, *Artificial neural network design for fault identification in a rotor-bearing system*, Mechanism and Machine Theory v.36, str.157-175, 2001.
- [15] Narendra K. S., Parthasarathy K.: *Identification and control of dynamical systems using neural networks*. IEEE Trans. Neural Networks, v.1, No. 1, str.4-27, 1990.
- [16] Oberholster A. J., Heyns P. S.: *On-line fan blade damage detection using neural network*. Mechanical Systems and Signal Processing v. 20, str. 78-93, 2006.
- [17] Sanz J., Perera R., Huerta C.: *Fault diagnosis of rotating machinery based on auto-associative neural networks and wavelet transforms*. Journal of Sound and Vibration, v.302, str. 981-999, 2007.
- [18] Natke H. G., Cempel C.: *Model-Aided Diagnosis of Mechanical Systems*. Wyd. Springer, Berlin 1997.
- [19] Piłat A.: *Sterowanie układami magnetycznej lewitacji*. Praca Doktorska, AGH 2002.
- [20] Piłat A. : *FEMLab software applied to active magnetic bearing analysis*. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. – 2004 v. 14 no. 4, str. 497–501.
- [21] Jing X. J., Lang Z. Q., Billings S. A.: *New bound characteristics of NARX model in the frequency domain*. International Journal of Control, 2007 v. 80, str. 140-149.

- [22] Van der Auweraer H., Guillaume P. Verboven P. Vanlanduit S.: *Application of fast-stabilizing frequency domain parameter estimation method*, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2001, v. 123, No. 4, str. 651-658.



**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.



**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.



**Dr inż. Adam PIŁAT** jest adiunktem w Katedrze Automatyki AGH. Jego prace badawcze ukierunkowane są na aktywne łożyska magnetyczne. Jest autorem i współautorem 25 publikacji poświęconych projektowaniu, modelowaniu, identyfikacji i sterowaniu obiektów mechatronicznych. Jest twórcą i współtwórcą ośmiu laboratoryjnych systemów badawczych.