

A MULTI-VALUED DIAGNOSTIC MODEL SYNTHESIS BASED ON DISCRETE WAVELET TRANSFORM

TWORZENIE WIELOWARTOŚCIOWEGO MODELU DIAGNOSTYCZNEGO Z WYKORZYSTANIEM DYSKRETNEJ TRANSFORMATY FALKOWEJ

Henryk Borowczyk

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
e-mail: borowczyk@post.pl

Abstract: *The method of a multi-valued diagnostic model synthesis using discrete wavelet transform is presented. The method's algorithm consists of three stages: (1) – signal decomposition into low- and high frequency parts – approximations and details, (2) - approximations and details parameterization, (3) – multi-valued encoding parameters obtained in stage 2. The method is illustrated with vibroacoustic signal in real life experiment. The multi-valued diagnostic model is the final result.*

Keywords: *multi-valued diagnostic model, discrete wavelet transform, signal parameterization*

Streszczenie: *W pracy przedstawiono metodę tworzenia wielowartościowego modelu diagnostycznego z wykorzystaniem dyskretnej transformaty falkowej. Algorytm metody składa się z trzech etapów: (1) – dekompozycja sygnału na składowe nisko- i wysokoczęstotliwościowe (aproksymacje i detale), (2) – wyznaczenie parametrów (charakterystyk statystycznych) aproksymacji i detali, (3) – przeprowadzenie wielowartościowego kodowania wyznaczonych parametrów. Rozważania przeprowadzono na przykładzie sygnału wibroakustycznego mierzonego podczas eksperymentu na obiekcie rzeczywistym. Końcowy rezultat przedstawiono w postaci wielowartościowego modelu diagnostycznego.*

Słowa kluczowe: *wielowartościowy model diagnostyczny, dyskretna transformata falkowa, parametryzacja sygnałów*

1. Wstęp

W diagnostyce wibroakustycznej maszyn wirnikowych analizowane są sygnały poliharmoniczne [1, 4, 5, 6, 9]. W celu wyodrębnienia informacji o procesach dynamicznych związanych z funkcjonowaniem obiektu oraz oddziaływaniem uszkodzeń, sygnały poddawane są transformacjom do dziedziny częstotliwości [5, 6]. Wykorzystuje się głównie transformatę Fouriera (w tym krótkoczasową) oraz falkową, która umożliwia jednoczesną analizę sygnału w dziedzinie czasu i częstotliwości [1, 7].

Informacja niezbędna w procesie diagnozowania pozyskiwana jest w wyniku czynnych i biernych eksperymentów przeprowadzanych na obiekcie rzeczywistym, badań laboratoryjnych i na modelach symulacyjnych oraz kwerend wiedzy ekspertów [1, 9, 10, 11, 12].

Charakter i zakres eksperymentów zależy od posiadanej informacji wstępnej, przewidywanego wykorzystania wyników badań oraz możliwości realizacyjnych – technicznych i formalno-prawnych.

W pracy przedstawiono metodę syntezy wielowartościowego modelu diagnostycznego z wykorzystaniem wyników eksperymentu przeprowadzonego na obiekcie rzeczywistym [1] oraz dyskretnej transformaty falkowej [14].

2. Eksperyment diagnostyczny

W diagnostyce złożonych obiektów technicznych można wyróżnić następujące rodzaje eksperymentów:

- badawczy – określenie wartości symptomów $d_r \in D, r=1,2,\dots,t$ dla znanych stanów obiektu $e_i \in E, i=1,2,\dots,n$, co umożliwia zbudowanie modelu diagnostycznego – relacji między stanami a symptomami;
- operacyjny – określenie bieżących wartości symptomów, a następnie ustalenie aktualnego stanu obiektu z wykorzystaniem modelu diagnostycznego;
- zespolony – łączy cechy eksperymentu operacyjnego i badawczego.

Eksperyment badawczy $Wibr_B(\bullet)$ może być przedstawiony w następującej postaci:

$$Wibr_B(zakr) = \langle E_{BWibr}(zakr), \{Y_{BWibr}(zakr)\} \rangle \quad (1)$$

gdzie:

- $E_{BWibr}(zakr)$ – zbiór wprowadzanych uszkodzeń elementów;
- $Y_{BWibr}(zakr)$ – zbiór drganiowych sygnałów diagnostycznych;
- $zakr$ – zakres pracy obiektu.

Realizacja eksperymentu badawczego na obiekcie rzeczywistym w normalnych warunkach eksploatacji jest praktycznie niemożliwa. Badania o charakterze quasi-podstawowym, których celem jest określenie wpływu znanych uszkodzeń na przebiegi sygnałów drganiowych prowadzone są na specjalnie przygotowanych obiektach, z wykorzystaniem odpowiednich stanowisk laboratoryjnych. Ze względu na złożoność i duże koszty tego typu eksperymentów są one stosunkowo rzadkie.

Eksperyment operacyjny przeprowadza się na obiekcie rzeczywistym o nieznanym a priori stanie technicznym.

$$Wibr_o(zakr) = \langle e_{OWibr}^2(zakr), Y_{OWibr}(zakr) \rangle \quad (2)$$

Jeżeli uzyskane wyniki badań diagnostycznych można uzgodnić z posiadaną bazą wiedzy, tzn.:

$$Y_{OWibr}(zakr) \subseteq \{Y_{BWibr}(zakr)\} \quad (3)$$

to określany jest bieżący stan obiektu

$$e_{OWibr}^2(zakr) = (e_{BWibr}^i(zakr) \in E_{BWibr}(zakr)) \quad (4)$$

W przeciwnym przypadku, stan obiektu pozostaje nieznanym i należy zastosować metodologię eksperymentu zespolonego.

Eksperyment zespolony składa się z dwóch faz: operacyjnej i badawczej, przy czym obligatoryjna jest faza operacyjna. Jeżeli symptomy z bieżącego badania diagnostycznego są zgodne z dotychczasową wiedzą – identyfikowany jest stan obiektu. W przeciwnym przypadku uruchamiana jest faza badawcza, w ramach której następuje aktualizacja wiedzy diagnostycznej z wykorzystaniem informacji z fazy operacyjnej, procesu odnowy, bezpośrednich metod oceny stanu (włącznie z kontrolnym demontażem) oraz badań symulacyjnych.

W niniejszej pracy rozpatrywany będzie eksperyment zespolony w diagnostyce wibroakustycznej, gdzie wykorzystuje się drgania i hałas jako nośniki informacji o stanie technicznym obiektów. Badania prowadzone są na ustalonych i/lub przejściowych zakresach pracy obiektu.

$$Wibr_z(zakr) = \langle e_{ZWibr}^*(zakr), Y_{ZWibr}(zakr) \rangle \quad (5)$$

Jeżeli spełniona jest zależność:

$$Y_{ZWibr}(zakr) \subseteq \{Y_{BWibr}(zakr)\} \quad (6)$$

to bieżący stan jest elementem zbioru znanych stanów:

$$e_{ZWibr}^*(zakr) = (e_{BWibr}^i(zakr) \in E_{BWibr}(zakr)) \quad (7)$$

jeżeli nie – uruchamiana jest procedura aktualizacji bazy wiedzy:

$$\{Y_{BWibr}(zagr)\}' = \{Y_{BWibr}(zagr)\} \cup Y_{ZWibr}(zagr) \quad (8)$$

$$E'_{BWibr}(zagr) = E_{BWibr}(zagr) \cup e^*_{ZWibr}(zagr) \quad (9)$$

W rezultacie zwiększa się liczność zbioru uszkodzeń oraz zbioru realizacji sygnałów diagnostycznych zawartych w bazie wiedzy.

Przykładem jest eksperyment przeprowadzony w ramach projektu badawczego, który obejmował zagadnienia związane z kompleksowym diagnozowaniem układu łożyskowania turbinowego silnika śmigłowcowego Allison 250-C20B [].

3. Parametryzacja sygnałów diagnostycznych

Wynikiem badań diagnostycznych są zbiory pierwotnych sygnałów, które muszą być przetworzone do postaci umożliwiającej skuteczne wnioskowanie diagnostyczne [1, 10, 11].

W celu zmniejszenia liczby danych wymagających analizy przeprowadza się parametryzację przebiegów czasowych polegającą na znalezieniu reprezentacji w postaci niewielkiego zbioru parametrów, przy zachowaniu informacji diagnostycznej niezbędnej w procesie wnioskowania [1, 2, 7].

Operacja parametryzacji przeprowadzana jest w ustalonej ramie czasowo-zdarzeniowej, przy określonym zdarzeniu inicjującym i/lub chwili początkowej oraz zdarzeniu finalnym i/lub chwili końcowej.

Do sygnałów wibroakustycznych można zastosować jedną z poniższych metod:

- transformacje z dziedziny czasu do częstotliwości – transformata Fouriera,
- transformacja falkowa – łączna analiza czasowo-częstotliwościowa,
- wyznaczenie charakterystyk statystycznych sygnału (np. wartość średnia, odchylenie standardowe).

W niniejszej pracy parametryzację sygnałów wibroakustycznych przeprowadzono z wykorzystaniem dyskretnej transformaty falkowej [14]. Jej istota polega na rozłożeniu analizowanego sygnału na dwie składowe – niskoczęstotliwościową (tzw. aproksymacja) i wysokoczęstotliwościową (tzw. detale), a następnie wyznaczeniu macierzy współczynników falkowych dla przyjętego zbioru poziomów dekompozycji.

Na rys. 1 i 2 przedstawiono przykładowe wyniki dyskretnej transformacji falkowej sygnału drganiowego s [13] z wykorzystaniem, odpowiednio, falek db8 i sym8 [14] dla dwunastu poziomów dekompozycji. Lewa część okna zawiera wykres sygnału s i dwunastu aproksymacji niskoczęstotliwościowych ($a_1 - a_{12}$), natomiast prawa – obraz współczynników cfs, sygnału s i detali wysokoczęstotliwościowych $d_1 - d_{12}$.

Szczegółowa analiza wskazuje na zależność wyników transformacji sygnału od rodzaju falki, zatem przed etapem syntezy modelu diagnostycznego należy podjąć decyzję odnośnie wyboru konkretnej falki (dalej wykorzystywana będzie falka db8).

W pierwszym przybliżeniu operację parametryzacji można przeprowadzić na podstawie charakterystyk statystycznych aproksymacji i detali. W tab. 1 przedstawiono obliczone wartości parametrów.

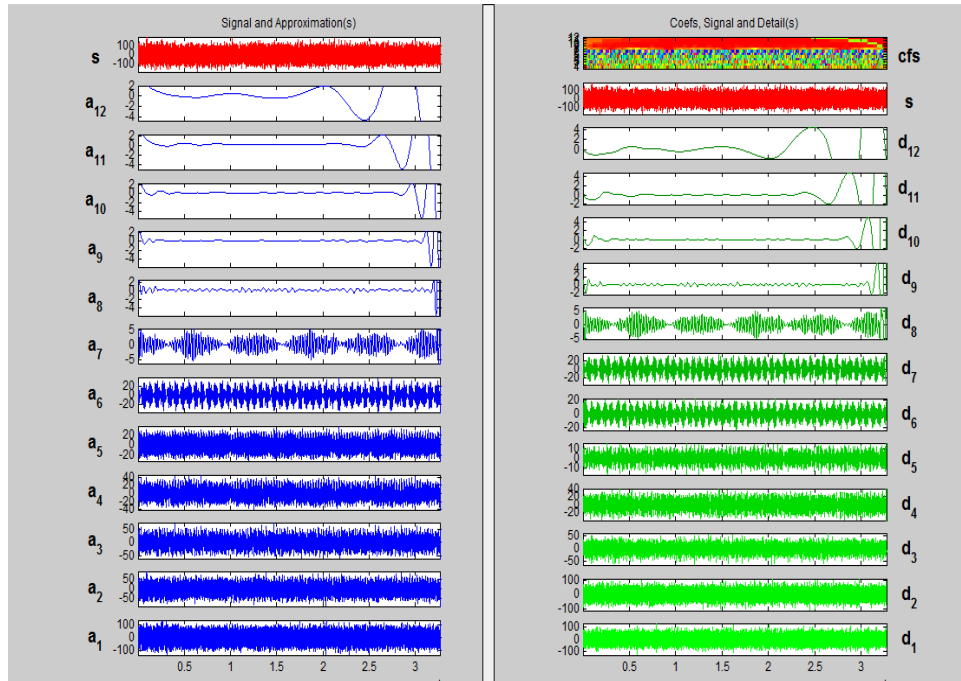
Symbolem aiA oznaczono i-ty parametr aproksymacji, natomiast aiD - i-ty parametr detalu. Jako parametry przyjęto:

- a1 – wartość średnia;
- a2 – mediana;
- a3 – wartość modalna;
- a4 – wartość maksymalna;
- a5 – wartość minimalna.

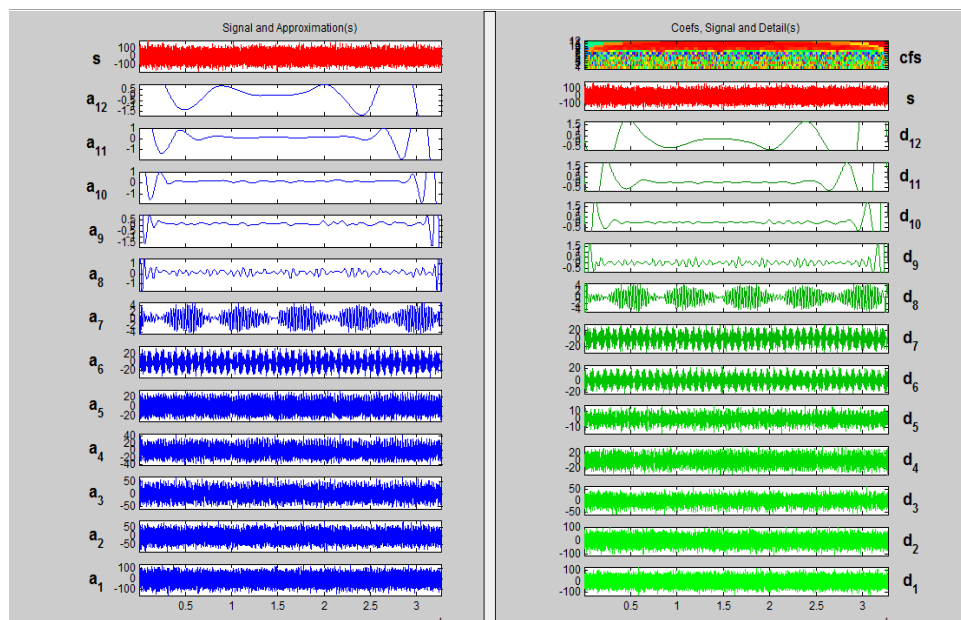
Analogiczne podejście można zastosować dla innych zbiorów parametrów opisujących aproksymacje, detale i współczynniki falkowe.

Tabela 1. Parametry aproksymacji i detali dyskretnej transformaty falkowej sygnału s (falka db8)

Lp	a1A	a2A	a3A	a4A	a5A	a1D	a2D	a3D	a4D	a5D
1	0,3	1,4	18,2	175,4	-202,0	0,2	-0,5	0,1	174,0	-162,7
2	0,4	-0,3	-9,6	177,8	-162,9	0,2	0,5	24,6	166,4	-174,0
3	0,5	-1,7	21,9	189,5	-135,0	0,0	-2,6	-17,5	129,5	-122,6
4	1,0	-2,4	-73,6	167,5	-140,2	0,5	0,1	-35,0	113,3	-114,8
5	1,5	1,6	-106,6	190,5	-173,3	0,1	-0,6	-7,7	72,3	-73,0
6	3,0	9,8	-133,3	227,3	-214,2	-0,1	-6,6	-73,4	129,3	-129,4
7	6,8	4,3	-20,5	127,0	-39,9	-2,3	-2,4	165,4	269,3	-297,3
8	16,1	3,5	1,7	153,9	-6,3	-0,9	0,0	-32,7	81,2	-58,2
9	41,3	4,2	4,3	219,5	0,6	-0,6	-0,5	1,6	43,8	-17,9
10	110,7	7,2	6,3	315,6	1,1	-0,7	-0,3	-0,4	45,7	-33,3
11	303,9	376,4	383,6	450,2	6,2	-2,3	-3,0	-8,6	59,0	-56,9
12	529,9	532,4	504,0	544,2	503,3	-4,9	-4,4	-16,5	73,2	-89,8



Rys. 1 Dyskretna transformata falkowa sygnału s (falka db8)



Rys. 2 Dyskretna transformata falkowa sygnału s (falka sym8)

4. Kodowanie parametrów

W wyniku zastosowania parametryzacji sygnałów otrzymuje się skończony zbiór parametrów diagnostycznych zawierający informację o stanie obiektu.

W procesie wnioskowania istotne są nie tyle dokładne wartości parametrów, ile ich przynależność do odpowiednich zakresów dających się zinterpretować w zbiorze klas stanu technicznego diagnozowanego obiektu [1, 2, 3,].

Zakresy zmienności parametrów diagnostycznych należy zatem podzielić na przedziały w taki sposób, aby z jednej strony zapewnić jak najwyższą rozdzielczość (rozdzielność stanów/uszkodzeń), a z drugiej – zminimalizować liczbę błędnych diagnoz.

Kodowanie całkowitoliczbowe polega na przypisaniu wartościom parametrów z określonego przedziału liczb rzeczywistych jednej liczby całkowitej ze znakiem. Zasada kodowania może być jednakowa dla wszystkich parametrów lub ustalana indywidualnie dla każdego z nich.

Oznaczając przez X_C wartość kodową parametru x uzyskaną w wyniku kodowania całkowitoliczbowego, ogólną zasadę kodowania można przedstawić w postaci (10).

$$X_C = \begin{cases} \dots \\ k-1 & \text{dla } x \in [x_{k-1}, x_k), k \leq K \\ \dots \\ 1 & \text{dla } x \in [x_1, x_2) \\ 0 & \text{dla } x \in (x_{1-}, x_1) \\ -1 & \text{dla } x \in (x_{2-}, x_{1-}] \\ \dots \\ -(k_- - 1) & \text{dla } x \in (x_{k-}, x_{(k-1)-}], k_- \leq K_- \\ \dots \end{cases} \quad (10)$$

gdzie: $\dots < x_{k_-} < \dots < x_{1-} < x_1 \dots < x_k < \dots$

Kod 0 przypisuje się przedziałowi wartości nominalnych (x_{1-}, x_1) parametru x obiektu zdatnego lub przedziałowi centralnemu wyników eksperymentu. Drugie podejście stosuje się w przypadku eksperymentu zespolonego; gdzie przestrzeń stanów i wyników eksperymentu jest otwarta. Należy przy tym zauważyć, że liczby przedziałów/kodów poniżej i powyżej przedziału nominalnego (K_- i K) nie muszą być jednakowe.

Wyznaczanie progów x_k , $k=1,2,\dots,K$ i x_{k_-} , $k_-=1,2,\dots,K_-$ można rozpatrywać jako zagadnienie formalne klasteryzacji danych lub heurystyczne. W pierwszym przybliżeniu najczęściej stosuje się podejście heurystyczne wykorzystujące wiedzę ekspercką i nie wymagające dużego zbioru danych statystycznych. W procesie rozwoju systemu diagnostycznego, po zgromadzeniu odpowiedniej ilości materiału eksperymentalnego, wstępnie wyznaczone progi poddawane są okresowej aktualizacji z zastosowaniem metod formalnych.

W przypadku eksperymentu badawczego, gdzie stan obiektu (w tym stan zdatności) jest znany, analizę należy rozpocząć od określenia przedziału nominalnych wartości rozpatrywanych parametrów. Kolejne progi ustala się w punktach istotnych zmian wartości parametrów uporządkowanych monotonicznie.

W eksperymencie zespolonym, którego wyniki opisuje rozkład Gaussa, przyjmuje się, że wartości parametrów z przedziału $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$, gdzie μ - wartość średnia, σ - odchylenie standardowe, odpowiadają stanowi zdatności, natomiast przekraczające kolejne progi

$$\begin{aligned} x_k &= \mu + k\sigma, \quad k = 1, \dots, K \\ x_{k_-} &= \mu - k\sigma, \quad k_- = 1, \dots, K_- \end{aligned} \quad (11)$$

sygnalizują stany niepełnej zdatności lub niezdatności. W takim przypadku progi rozłożone są równomiernie i symetrycznie względem wartości średniej.

Tabela 2 zawiera wyniki całkowitoliczbowego kodowania parametrów przedstawionych w tab. 1.

Tabela 2. Wielowartościowa reprezentacja parametrów aproksymacji i detali dyskretnej transformaty falkowej sygnału s (falka db8)

Lp	a1A	a2A	a3A	a4A	a5A	a1D	a2D	a3D	a4D	a5D
1	-3	0	0	-1	-3	2	-2	1	2	-2
2	-3	0	0	-1	-2	2	1	2	2	-2
3	-3	0	0	0	-1	2	-3	-1	1	-1
4	-3	0	-2	-1	-1	3	1	-2	0	0
5	-3	0	-3	0	-2	2	-2	0	-1	1
6	-3	0	-3	0	-3	1	-3	-2	1	-1
7	-2	0	0	-3	0	-2	-3	3	3	-3
8	-1	0	0	-2	1	0	1	-2	0	2
9	0	0	0	0	2	0	-2	1	-3	3
10	1	0	0	1	2	0	-2	0	-3	3
11	2	2	2	2	2	-2	-3	0	-2	2
12	3	3	3	3	3	-3	-3	-1	-1	0

Po przeprowadzeniu kodowania parametrów otrzymuje się wielowartościowy model diagnostyczny (uogólnienie stosowanych powszechnie modeli binarnych) opisujący relacje między zbiorem uszkodzeń i zbiorem symptomów (kodowych wartości parametrów diagnostycznych).

Taka forma modelu jest dogodna do dalszych analiz, mających na celu wyznaczenie optymalnego zbioru symptomów zapewniającego rozróżnialność stanów z założoną dokładnością [3], a następnie zbioru reguł wnioskowania w ekspertrym systemie diagnostycznym [2, 7, 8].

5. Podsumowanie

Przedstawiona metoda syntezy wielowartościowego modelu diagnostycznego z wykorzystaniem dyskretnej transformaty falkowej umożliwia istotne zmniejszenie ilości danych niezbędnych do przeprowadzenia wnioskowania diagnostycznego. Może być stosowana w różnych obszarach diagnostyki, gdzie wynikiem eksperymentu są przebiegi czasowe sygnałów.

Proponowane podejście umożliwia elastyczny rozwój modelu diagnostycznego w trakcie gromadzenia wiedzy w kolejnych eksperymentach (badawczych, operacyjnych i zespolonych).

6. Literatura

- [1] Borowczyk H.. (red.) Problemy kompleksowego diagnozowania układu łożyskowania turbinowego silnika śmigłowego. Wyd. Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych. Warszawa 2011, 163 s.
- [2] Borowczyk H.. Ekspertym system wspomagania wnioskowania diagnostycznego. W: Borowczyk H.. (red.) Problemy kompleksowego diagnozowania układu łożyskowania turbinowego silnika śmigłowego. Wyd. Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych. Warszawa 2011, s. 147-163
- [3] Borowczyk H.: Quasi-informacyjna metoda wyznaczania programu diagnozowania złożonych obiektów technicznych, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa 1984.
- [4] Borowczyk H., Lindstedt P., Magier J.: Układ łożyskowania turbinowego silnika śmigłowego jako obiekt diagnozowania. W : Borowczyk H.. (red.) Problemy kompleksowego diagnozowania układu łożyskowania turbinowego silnika śmigłowego. Wyd. Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych. Warszawa 2011, s. 21-30
- [5] Cempel Cz.: Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn, WNT, Warszawa 1982.
- [6] Cempel Cz.: Wibroakustyka stosowana, WNT, Warszawa 1989.
- [7] Cholewa W.: Data processing and reasoning in technical diagnostics. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1995.

- [8] Korbicz J. i in.: Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania. WNT, Warszawa 2002.
- [9] Lindstedt P., Borowczyk H., Magier J.: Diagnostyka silnika śmigłowego w inżynierijno-lotniczym otoczeniu, „Prace Naukowe ITWL”, zeszyt nr 17. Wyd. ITWL, Warszawa 2003.
- [10] Lindstedt P., Borowczyk H.: Kompleksowy system diagnostyczny statku powietrznego, w: Problemy Badań i Eksploatacji Techniki Lotniczej, tom 4, rozdz. 7, Wyd. ITWL, Warszawa 1999.
- [11] Lindstedt P.: Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy. Wyd. Naukowe ASKON, Warszawa 2002.
- [12] Niziński S.: Elementy eksploatacji obiektów technicznych, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn 2000.
- [13] Spychała J., Szczekała M., Żokowski M.: Diagnozowanie w dziedzinie wibroakustycznej. W: Borowczyk H. (red.) Problemy kompleksowego diagnozowania układu łożyskowania turbinowego silnika śmigłowego. Rozdz. 5. Wyd. Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych Warszawa 2011
- [14] Wavelet toolbox. User's guide. Mathworks 2011



Dr inż. Henryk Borowczyk, Zakład Silników Lotniczych, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa. Działalność naukowo-badawcza: kompleksowa diagnostyka lotniczych silników turbinowych z wykorzystaniem teorii informacji, metod identyfikacji matematycznych modeli układów dynamicznych i sztucznej inteligencji.