

DIAGNOSTYKA LOKALNYCH USZKODZEŃ ZĘBÓW KÓŁ PRZEKŁADNI PRZY UŻYCIU SZYBKIEJ TRANSFORMATY FOURIERA I LOGIKI ROZMYTEJ

Piotr CZECH

Katedra Budowy Pojazdów Samochodowych, Wydział Transportu, Politechnika Śląska
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, e-mail: piotr.czech@polsl.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki prób mających na celu budowę klasyfikatora lokalnych uszkodzeń zębów kół przekładni, zbudowanego w oparciu o logikę rozmytą. Obiekt badań stanowiła przekładnia zębata o zębach prostych, pracująca na stanowisku mocy krążącej FZG. Badaniami objęto przekładnie z kołami bez uszkodzeń oraz z lokalnymi uszkodzeniami zębów w postaci pęknięcia u podstawy zęba oraz wykruszenia wierzchołka zęba. Zaproponowano również sposób budowy systemów diagnozujących lokalne uszkodzenia zębów kół. Do tego celu wykorzystano sygnały drganiowe poddane odpowiedniej filtracji oraz przetwarzaniu.

Słowa kluczowe: diagnostyka, przekładnie zębate, logika rozmyta, szybka transformata Fouriera.

THE DIAGNOSTIC OF TOOTH GEARS FAILURES BY USING FAST FOURIER TRANSFORM AND FUZZY LOGIC

Summary

This article presents the tests results showing the construction of the local damages classifier of the transmission gear teeth, built on the basis of the fuzzy logic. The tested object was the transmission gear with straight teeth, working on the circulating power FZG stand. The tests included the gears with the undamaged teeth and with the locally damaged teeth in the form of the crack root and the chip tip of the tooth. The construction of the systems diagnosing the local damages of the teeth was also proposed. To achieve this aim, the vibration signals which had undergone proper filtration and processing were used.

Keywords: diagnostics, gearboxes, fuzzy logic, fast Fourier transform.

1. WSTĘP

Jednym z elementów, od których nierzadko zależy życie ludzkie, są przekładnie zębate. Znajdują one zastosowanie w większości układów przeniesienia napędu i to zarówno we wszelkiego rodzaju maszynach, jak również środkach transportu. Przekładnia zębata stanowi bardzo ważną część łańcucha kinematycznego układu przeniesienia mocy pomiędzy silnikiem a odbiornikiem energii. Z dotychczasowych badań wynika, że około 60% niesprawności przekładni zębatych spowodowane jest lokalnymi uszkodzeniami, do których należy pęknięcie u podstawy zęba oraz wykruszenie wierzchołka zęba. Szczególnie ważne wydaje się stworzenie takich metod, które pozwolą wykryć wszelkiego rodzaju uszkodzenia już we wczesnych ich stadiach. Szybkość rozprzestrzeniania się zaburzeń wibroakustycznych wywołanych zmianą stanu obiektu powoduje, że metody wibroakustyczne są szczególnie przydatne w przypadkach pojawienia się uszkodzenia [3, 5, 8-10, 13, 14, 16-18]. W literaturze można znaleźć wiele opracowań dotyczących diagnozowania przekładni zębatych, lecz Autorzy wskazują na konieczność dalszych badań wynikłych z trudności w jednoznacznym wykrywaniu miejscowych uszkodzeń kół zębatych.

Jest to spowodowane tym, iż w początkowej fazie defekty te nie powodują zauważalnych zmian ogólnego poziomu sygnałów wibroakustycznych. Należy jednak podkreślić, że drgania i hałas układów napędowych są ściśle związane z ich stanem technicznym. Jak podaje Autor w [3] sygnał drganiowy jest lepszym nośnikiem informacji o stanie obiektu technicznego niż sygnał akustyczny. Wynika to z faktu, iż może on być zakłócony jedynie przez ruch bliskich par kinematycznych, natomiast sygnał akustyczny dodatkowo może podlegać zakłóceniu przez efekty akustyczne pochodzące od różnych niesprawności w maszynie oraz efekty związane z własnościami otoczenia pomiarowego. W związku z tym w niniejszym opracowaniu skupiono się tylko na wykorzystaniu sygnałów drganiowych w procesie diagnozowania dwóch rodzajów uszkodzeń zębów kół w postaci pęknięcia u podstawy zęba oraz wykruszenia wierzchołka zęba. Oprócz zidentyfikowania występującego rodzaju uszkodzenia starano się również zdiagnozować jego stopień, tj. 1 i 3 mm pęknięcia u podstawy zęba oraz wykruszenia wierzchołka zęba o wartości 0,75; 1,5 i 2 mm.

Sygnał drganiowy przekładni zębatej można przedstawić jako sumę stacjonarnego sygnału ząbienia i resztkowej części sygnału zawierającej

składowe impulsowe wywołane lokalnymi uszkodzeniami kół zębatych [8]. Poza składowymi związanymi z harmonicznymi częstotliwościami zazębienia i występującymi wokół nich wstęgami bocznymi będącymi wynikiem modulacji częstotliwościami obrotowymi kół, występują składowe związane z uszkodzeniem kół zębatych stanowiące niskoenergetyczną część widma sygnału [13].

W diagnostyce przekładni zębatych stosuje się wiele różnych metod analizy sygnałów, których podstawę stanowi odpowiednio wyselekcjonowany sygnał. Dodatkowo w celu eliminacji przypadkowych zakłóceń może on zostać uśredniony synchronicznie. Zastosowanie uśredniania w odpowiednio dobranym okresie powoduje zmniejszenie wpływu zaburzeń niezwiązanych z uszkodzeniem. W przypadku zmiennej prędkości obrotowej cennym może być wykorzystanie zmodyfikowanej procedury decymacyjnej transformującej skalę rzeczywistego czasu na względny czas cyklu. Synchronizacja cyklem realizowana jest poprzez przepróbkowanie sygnału powodujące wyrównanie długości dyskretnej reprezentacji kolejnych cykli, a dzięki temu zbliżenie do sygnału stacjonarnego [1]. Dla tak wstępnie przetworzonych sygnałów stosuje się różne metody analizy w dziedzinie czasu, częstotliwości oraz czasu i częstotliwości. Jedną z metod umożliwiającą analizę sygnałów w dziedzinie częstotliwości jest algorytm szybkiej transformaty Fouriera (FFT). Przekształcenie to cechuje się dobrą rozdzielczością w dziedzinie częstotliwości, pozwala na uzyskanie informacji o średnich amplitudach częstotliwości składowych rozpatrywanego procesu, a tym samym umożliwia zastosowanie odpowiedniej selekcji sygnału w dziedzinie częstotliwości. Właściwość tą wykorzystano w niniejszym opracowaniu do budowy modeli diagnostycznych wykorzystujących logikę rozmytą. Należy jednak podkreślić, iż w wielu pracach Autorzy zwracają uwagę na fakt, że powstanie uszkodzeń kół zębatych może prowadzić do intensyfikacji zjawisk nieliniowych, jak również występowania efektów niestacjonarnych [5, 17, 18]. W takich przypadkach stosowanie analizy widmowej nie jest zalecane.

Jak dotąd w literaturze brak jest gotowych rozwiązań z zakresu diagnostyki powstawania i rozwoju uszkodzeń zębów, które pozwoliłyby wykryć ten stan jeszcze we wczesnych stadiach rozwoju. W ostatnich latach w literaturze pojawiły się przykłady zastosowania metod sztucznej inteligencji w zadaniach diagnostyki. Jako największą trudność w procesie projektowania systemów wykorzystujących sztuczną inteligencję literatura podaje konieczność podejścia do każdego z zadań indywidualnie. Dotychczas nie udało się opracować jednoznacznych wytycznych co do sposobów budowy i nauki takich systemów. Pośród

metod sztucznej inteligencji można wyróżnić logikę rozmytą [4-7, 11, 12, 15].

Logika rozmyta jest bardzo skutecznym sposobem przetwarzania informacji niepewnej i nieprecyzyjnej, czyli takiej, jaka występuje w praktyce [5]. Ze względu na swoje cechy może być z powodzeniem stosowana w systemach diagnozowania stanu obiektów technicznych.

Struktura modelu rozmytego składa się z bloku fuzyfikacji, interferencji oraz defuzyfikacji. W bloku fuzyfikacji (rozmywania) dla ostrych wartości wejściowych (x) zostaje wyznaczony stopień przynależności ($\mu(x)$) do poszczególnych zbiorów rozmytych. W tym bloku zdefiniowane są funkcje przynależności do zbiorów rozmytych kolejnych wejść systemu. Funkcje przynależności muszą być dokładnie zdefiniowane jakościowo (rodzaj funkcji) i ilościowo (parametry, współczynniki funkcji). Na podstawie stopnia przynależności wejść kolejny blok systemu rozmytego wyznacza wynikową funkcję przynależności. Blok interferencji musi zawierać bazę reguł, mechanizm interferencyjny oraz funkcję przynależności wyjścia modelu. W bazie reguł zawarte są zależności przyczynowo-skutkowe wyjścia od wejść modelu, np.: reguła 1: jeśli ($x_1 = A_1$) i ($x_2 = B_1$) to ($y = C_1$).

W mechanizmie interferencyjnym zostaje obliczony stopień spełnienia poszczególnych reguł, stopień aktywacji konkluzji poszczególnych reguł oraz wynikowa postać funkcji przynależności wyjścia. W ostatnim bloku systemu rozmytego na podstawie wynikowej funkcji przynależności wyjścia wyznacza się ostrą wartość wyjścia (y). Dokładne omówienie metod stosowanych w celu wyznaczenia wartości wyjściowej zostało przedstawione w pracach [4, 6, 7, 11, 12, 15].

W niniejszym artykule zostanie przedstawiona propozycja sposobu wykorzystania logiki rozmytej do celów diagnostycznych.

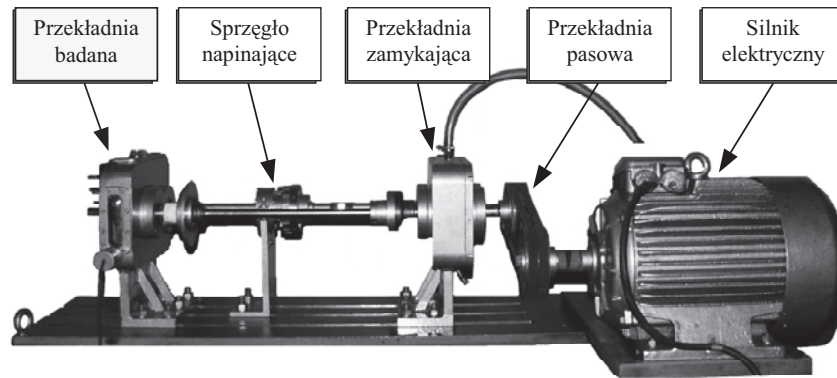
2. OPIS EKSPERYMENTU

W przeprowadzonych doświadczeniach podjęto próbę zbudowania klasyfikatora rodzaju i stopnia uszkodzenia zębów kół przekładni wykorzystującego logikę rozmytą.

Obiekt badań stanowiła przekładnia zębata o zębach prostych pracująca na stanowisku mocy krążącej, o liczbie zębów zębniaka i koła 16 i 24.

Zmierzone na stanowisku mocy krążącej sygnały prędkości drgań poprzecznych wału koła (rys. 1) stanowiły bazę w budowie wzorców rodzaju i stopnia uszkodzenia zębów kół przekładni dla projektowanych klasyfikatorów.

Układ pomiarowy składał się z czujników położenia kąтового wałów, jednostki logicznej, wirometru laserowego, analizatora sygnałów oraz komputera. Pomiaru drgań poprzecznych wału koła



Rys. 1. Stanowisko mocy krążącej FZG

dokonano za pomocą wibrometru laserowego Ometron VH300+.

Pomiary wykonywano dla nieuszkodzonej przekładni, jak również z zamodelowanymi uszkodzeniami w postaci pęknięcia u podstawy zęba (na głębokości: 1 mm, 3 mm) oraz wykruszenia wierzchołka zęba (o wartość: 0,75 mm, 1,5 mm, 2 mm) [5, 6]. Każdą z serii pomiarowych przeprowadzono dla przekładni zębatej pracującej przy prędkościach obrotowych wału koła wynoszących 900 obr/min i 1800 obr/min, oraz przy obciążeniach wynoszących 2,58 MPa, i 3,85 MPa. W rezultacie otrzymano macierz składającą się z 971 sygnałów prędkości drgań poprzecznych wału koła.

Zarejestrowane sygnały drganiowe poddano działaniu filtrów dolnoprzepustowych w zakresie 6 i 12 kHz, filtrów umożliwiających uzyskanie sygnałów resztkowych i różnicowych, filtru w zakresie 0,5-1,5 częstotliwości zazębienia. Sygnały resztkowe otrzymano poprzez usunięcie z widma pasm zawierających składowe obrotowe wałów kół i ich harmoniczne oraz składowe częstotliwości zazębienia i jej harmoniczne, zaś różnicowe dodatkowo usuwając pasma wokół częstotliwości zazębienia i ich harmonicznych obejmujące wstęgi boczne związane z częstotliwościami obrotowymi kół zębatych. Następnie stosując odwrotną transformatę Fouriera otrzymano sygnały czasowe. Z otrzymanych sygnałów czasowych drgań wyznaczono widma, w których wyodrębniono następujące zakresy częstotliwości:

- $f \in \langle 0, f_o \rangle$,
- $f \in \langle f_z - f_o, f_z \rangle$,
- f_z ,

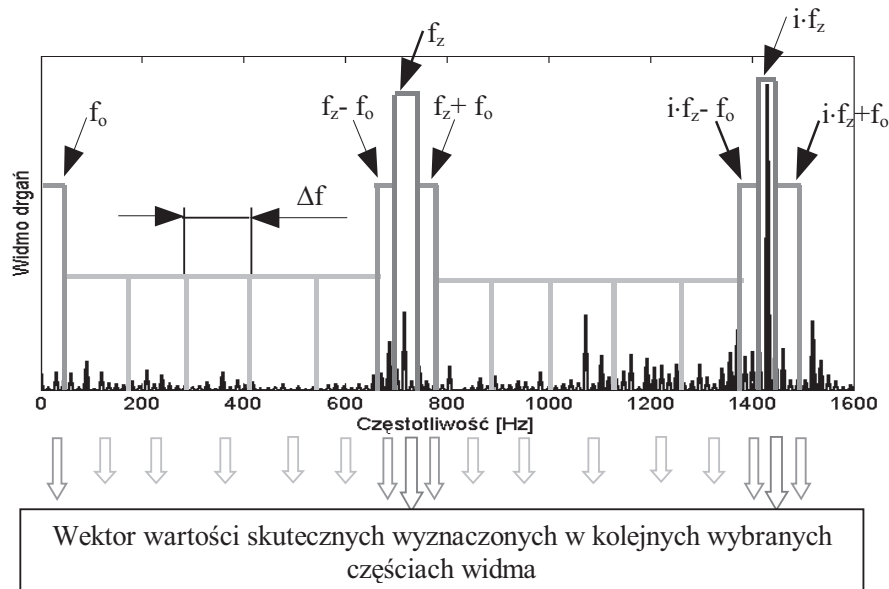
$$- f \in \langle f_z, f_z + f_o \rangle.$$

Zakres $f \in \langle f_o, f_z - f_o \rangle$ podzielono na 20, 10 i 5 podzakresów. Podział na podzakresy o długościach $\Delta f \cong 30$ Hz, $\Delta f \cong 65$ Hz oraz $\Delta f \cong 150$ Hz miał na celu sprawdzenie wpływu wielkości podzakresu na wartość błędu klasyfikatora. Każdą z otrzymanych części widma częstotliwości scharakteryzowano pod względem zmienności amplitudy poprzez wyznaczenie wartości skutecznej (rys. 2).

Obliczenia zostały powtórzone dla wszystkich zarejestrowanych na stanowisku mocy krążącej FZG przebiegów czasowych. Z tak otrzymanej macierzy wyznaczono dla każdej wyodrębnionej części widma wartości minimalne i maksymalne występujące w przypadku danego rodzaju i stopnia uszkodzenia. Dodatkowo z uśrednionych zarejestrowanych prędkości drgań dla danego rodzaju i stopnia uszkodzenia wyznaczono wartość skuteczną w każdej z wyselekcjonowanych części widma.

Na podstawie otrzymanych wartości podjęto próbę określenia funkcji przynależności wejść. Sposób postępowania przy określaniu punktów charakterystycznych dla funkcji przynależności wejść systemu diagnostycznego przedstawiono schematycznie na rysunku 3.

Tak wyznaczone estymaty posłużyły do określenia punktów charakterystycznych funkcji przynależności wejść. Na podstawie literatury do badań za funkcję przynależności wejść wybrano funkcję trójkątną (rys. 4). Sposób określania punktów charakterystycznych dla funkcji trójkątnej przyjęto zgodnie z tabelą 1 i 2.



Rys. 2. Sposób przeprowadzenia selekcji widmowej

Tabela 1: Sposób „A” określania punktów charakterystycznych funkcji przynależności wejść

Sposób „A” określania punktów charakterystycznych funkcji przynależności wejść
$a = \min(FFT(v))$
$c = \max(FFT(v))$
$b = \frac{\min(FFT(v)) + \max(FFT(v))}{2}$

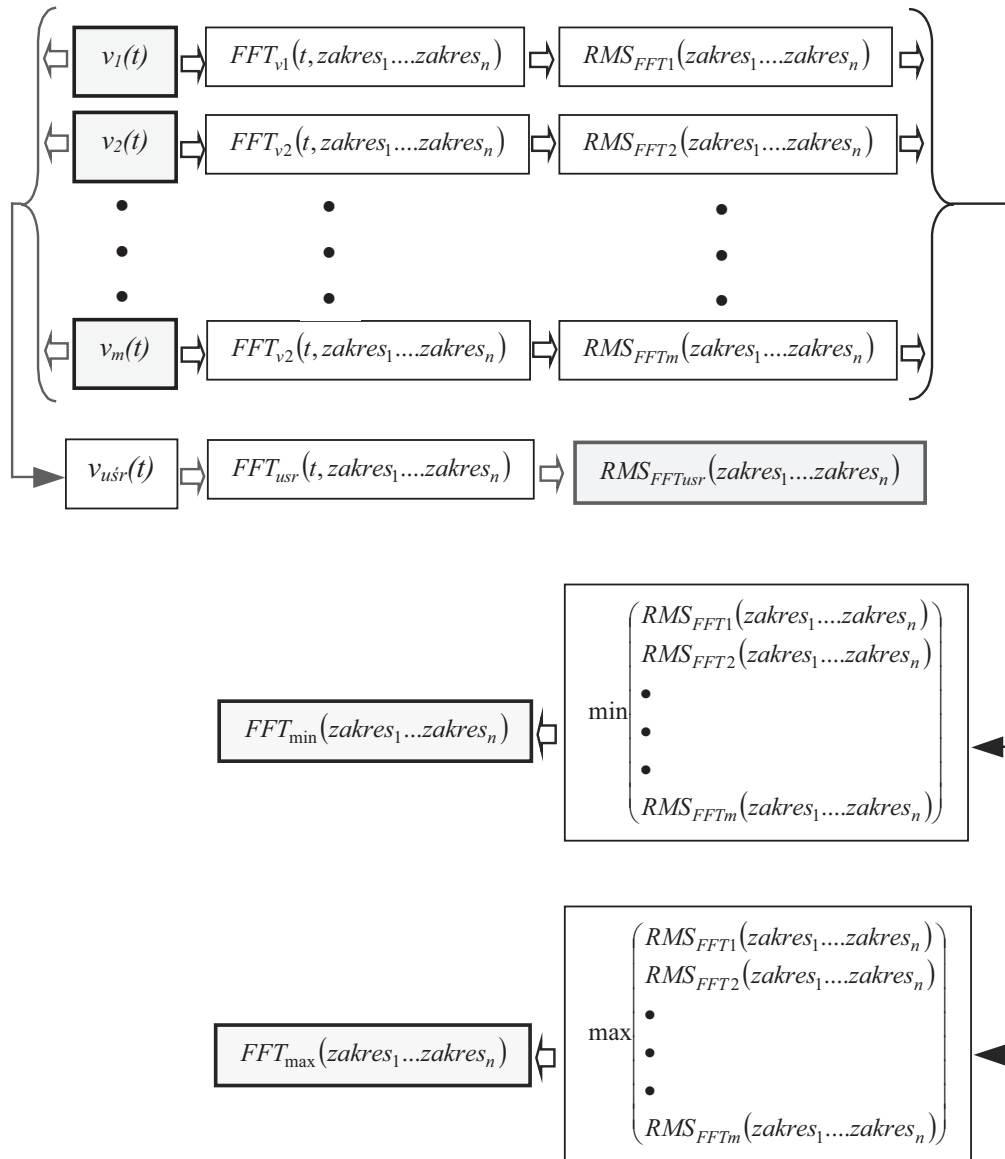
Ze względów czasowych w przeprowadzonych doświadczeniach sprawdzano przydatność tylko funkcji trójkątnych. Należy przy tym zauważyć, iż celem potwierdzenia poprawności wyboru kolejne badania zostaną przeprowadzone dla systemów diagnostycznych, w których funkcja przynależności wejść zostanie określona jako trapezoidalna oraz gaussowska. Dopiero po przeprowadzeniu pełnych badań można będzie odpowiedzieć na pytanie dotyczące słuszności wyboru rodzaju funkcji przynależności wejść.

We wstępnej części przeprowadzonego doświadczenia wyznaczono funkcje przynależności wejść dla trzech sposobów selekcji widmowej dla przekładni pracującej przy dwóch prędkościach i dwóch obciążeniach. Celem ograniczenia liczby wejść systemu diagnostycznego wykorzystującego logikę rozmytą w przeprowadzonych doświadczeniach wykorzystano zakres częstotliwości $f \in \langle 0, f_z + f_0 \rangle$.

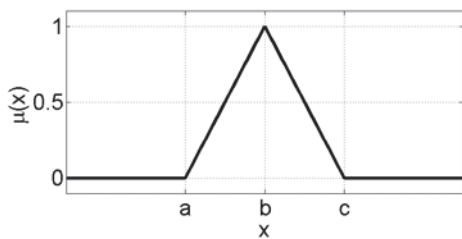
Tabela 2: Sposób „B” określania punktów charakterystycznych funkcji przynależności wejść

Sposób „B” określania punktów charakterystycznych funkcji przynależności wejść
$a = \min \begin{pmatrix} \min(FFT(v)) \\ \max(FFT(v)) \\ FFT(v_{usr}) \end{pmatrix}$
$c = \max \begin{pmatrix} \min(FFT(v)) \\ \max(FFT(v)) \\ FFT(v_{usr}) \end{pmatrix}$
$b = \min(FFT(v))$ lub $b = \max(FFT(v))$ lub $b = FFT(v_{usr})$ gdzie: $a < b < c$

Rysunek 5 przedstawia punkty charakterystyczne funkcji przynależności określone dla przykładowego wyodrębnionego zakresu widma sygnału drganiowego zarejestrowanego przy jednej prędkości obrotowej i jednym obciążeniu.



Rys. 3. Sposób określania punktów charakterystycznych funkcji przynależności wejść systemu diagnostycznego

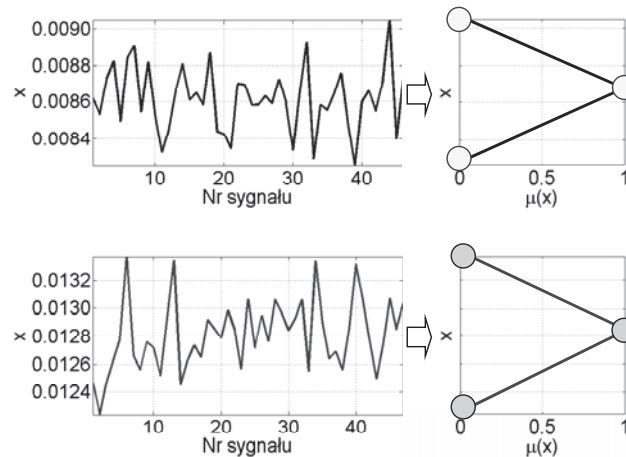


Rys. 4. Wybrana funkcja przynależności wejść

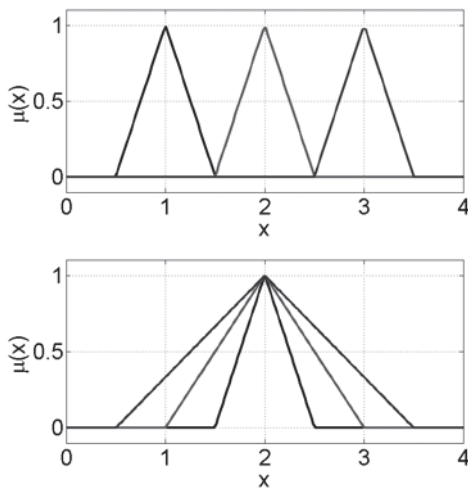
Spośród wszystkich utworzonych zestawów wybrano 13, w skład których wchodziły najlepiej dostosowane do procesu klasyfikacji wejścia. Postępowano zgodnie z ideą przedstawioną na rysunku 6. Najlepsza sytuacja wystąpiłaby, gdyby z całego zakresu możliwych do wystąpienia

wartości danej estymaty (oś x) zostałyby wyodrębnione niepokrywające się przedziały odpowiadające kolejnym stopniom uszkodzenia zębów kół. W tym przypadku wystarczyłaby znajomość tej estymaty, aby dokładnie określić występujące uszkodzenia. Równocześnie nie byłoby potrzeby tworzenia skomplikowanego w budowie systemu diagnostycznego opartego na logice rozmytej. Niestety w przeprowadzonych doświadczeniach nie zarejestrowano wystąpienia takiego przypadku.

Również w przypadku wyjść systemu wykorzystującego logikę rozmytą do celów diagnostycznych przekładni zębatej zastosowano dwa sposoby rozmywania (rys. 7 i 8).



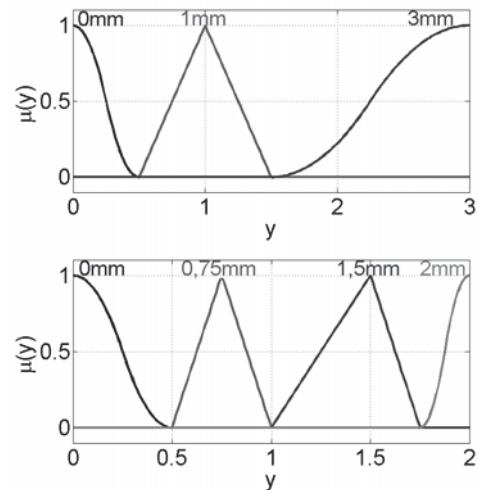
Rys. 5. Przykładowe określone punkty charakterystyczne funkcji przynależności wejść dla kół: (a) bez uszkodzeń, (b) z wykruszonym o wartość 2 mm wierzchołkiem zęba



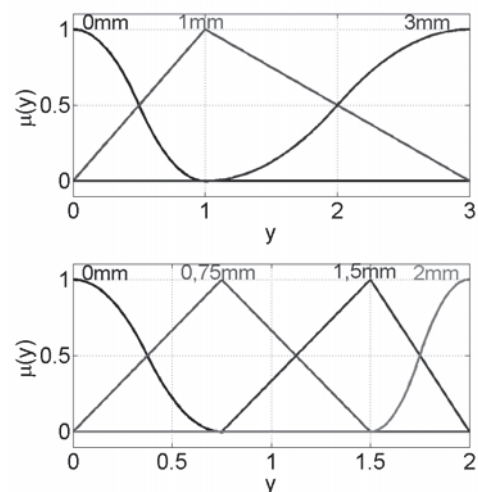
Rys. 6. Wybrana funkcja przynależności wejść: (a) przypadek najlepszy, (b) przypadek najgorszy

Określenie występującego rodzaju i stopnia uszkodzenia zębów kół stanowiło cel przeprowadzanego procesu diagnostycznego. Równocześnie zamodelowane w eksperymencie uszkodzenia stanowiły klasy, do których system diagnostyczny miał zakwalifikować dane uszkodzenie. Klasy te określały położenie punktów, dla których funkcja przynależności wejść przyjmowała wartość równą 1. W eksperymentach przyjęto dla klas skrajnych sigmoidalną funkcję przynależności, zaś dla pozostałych klas zastosowano funkcję trójkątną. Przyjęte w badaniach sposoby określania punktów charakterystycznych funkcji przynależności wejść są widoczne na przykładach zamieszczonych na rysunkach 7 i 8.

Przeprowadzenie badań z różnymi sposobami rozmywania wejść i wyjść miało na celu zbadanie ich wpływu na wynik procesu klasyfikacji rodzaju i stopnia uszkodzenia zębów kół przekładni.



Rys. 7. Sposób „1” budowy rozmytych wyjść systemu logiki rozmytej dla uszkodzenia w postaci: (a) pęknięcia u podstawy zęba, (b) wykruszenia wierzchołka zęba



Rys. 8. Sposób „2” budowy rozmytych wyjść systemu logiki rozmytej dla uszkodzenia w postaci: (a) pęknięcia u podstawy zęba, (b) wykruszenia wierzchołka zęba

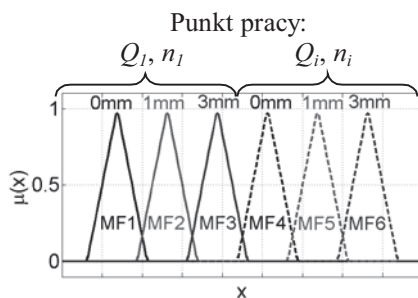
Doświadczenia z udziałem systemów logiki rozmytej przeprowadzono oddzielnie dla dwóch rodzajów uszkodzenia przekładni zębatej w postaci pęknięcia u podstawy zęba oraz wykruszenia wierzchołka zęba w różnych punktach pracy maszyny:

- $Q = 2,58$ MPa, $n = 900$ obr/min,
- $Q = 2,58$ MPa, $n = 1800$ obr/min,
- $Q = 3,85$ MPa, $n = 900$ obr/min,
- $Q = 3,85$ MPa, $n = 1800$ obr/min.

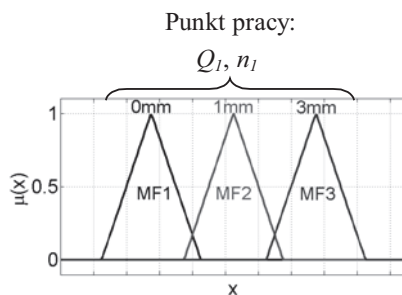
Punkty pracy maszyny były zgodne z wybranymi w procesie rejestracji przebiegów drganiowych na stanowisku mocy krążącej FZG.

Dodatkowo przeprowadzono eksperymenty z wykorzystaniem klasyfikatorów jednego rodzaju uszkodzenia, niezależnie od obciążenia i prędkości obrotowej wałów kół przekładni zębatej, oraz obu rodzajów uszkodzenia diagnozowanych przez jeden klasyfikator.

W czasie budowy bazy reguł systemu logiki rozmytej korzystano z dwóch sposobów przedstawionych schematycznie na rysunku 9 i 10.



Rys. 9. System „I” budowy reguł systemu logiki rozmytej, MF1...6 – kolejne funkcje przynależności



Rys. 10. System „II” budowy reguł systemu logiki rozmytej, MF1...6 – kolejne funkcje przynależności

W „I” typie systemu dla każdego wejścia zakodowano wszystkie występujące punkty pracy maszyny, natomiast w „II” typie systemu każde z wejść zostało zwielokrotnione o liczbę analizowanych punktów pracy przekładni zębatej. Sposób ten jest analogiczny z wykorzystywanym w czasie badań nad klasyfikacją stopnia uszkodzenia przekładni zębatej pracującej przy jednym momencie obciążenia i jednej prędkości obrotowej wałów kół.

Zbiór reguł zapisano w postaci:

jeśli x_1 jest A_1 i x_2 jest A_2 ... i x_k jest A_k
to klasa 1,

jeśli x_1 jest B_1 i x_2 jest B_2 ... i x_k jest B_k
to klasa 2,

...

jeśli x_1 jest Z_1 i x_2 jest Z_2 ... i x_k jest Z_k
to klasa N ,

gdzie:

$x_1 \dots x_k$ - wartości estymat wyznaczonych w danej części widma,

k - liczba wejść systemu diagnostycznego,

$A_1 \dots A_k$, $B_1 \dots B_k$, $Z_1 \dots Z_k$ - określony dla każdego wejścia osobno przedział wartości estymat wyznaczonych w danej części widma, który odpowiada danej klasie uszkodzenia,

klasa 1, klasa 2...klasa N - rozpoznawana klasa uszkodzenia zębów kół,

N - liczba klas uszkodzeń zębów kół.

3. OPIS EKSPERYMENTU

W pierwszej serii przeprowadzonych badań zbudowano systemy klasyfikujące stopień jednego rodzaju uszkodzenia zębów kół przekładni pracującej przy określonej prędkości obrotowej oraz obciążeniu. Eksperymenty powtórzono dla uszkodzenia w postaci pęknięcia u podstawy zęba oraz wykruszenia wierzchołka zęba. Błąd otrzymany z różnych typów systemów diagnostyki stopnia pęknięcia w stopie zęba wyniósł w granicy 5-15%. W przypadku systemów diagnozujących stopień wykruszenia wierzchołka zęba, uzyskane wyniki błędu klasyfikacji charakteryzują się znacznie większą rozpiętością niż w przypadku analogicznie zbudowanych systemów służących do diagnostyki stopnia pęknięcia w stopie zęba. Dla większości przypadku wykorzystanych typów systemów najniższe wartości błędu wyniosły w granicy 2-20%. Otrzymane rozpiętości w uzyskiwanych wartościach błędu klasyfikacji wskazują na duże znaczenie sposobu określania punktów charakterystycznych funkcji przynależności wejść (systemy logiki rozmytej typu A i B - tabela 1 i 2) oraz punktów charakterystycznych funkcji przynależności wyjść (systemy logiki rozmytej typu 1 i 2 - rys. 7 i 8).

Tabele 3 i 4 przedstawiają zestawienia najlepszych uzyskanych wyników klasyfikacji stopnia uszkodzenia zębów kół przekładni pracującej przy jednym obciążeniu i jednej prędkości obrotowej dla systemów diagnozujących jeden rodzaj uszkodzenia.

Ponieważ przekładnie zębate w układach napędowych pracują zwykle przy różnych prędkościach i obciążeniach postanowiono w kolejnych doświadczeniach przeprowadzić testy z wykorzystaniem systemów diagnozujących jeden

rodzaj uszkodzenia zęba koła przekładni pracującej przy różnych prędkościach i różnych obciążeniach.

Tabela 3. Zestawienie najlepszych wyników klasyfikacji pęknięcia u podstawy zęba koła przekładni pracującej przy jednej prędkości obrotowej wałów i jednym obciążeniu

Nr punktu pracy		1	2	3	4
Typ systemu	Liczba podzakresów	Błąd klasyfikacji [%]			
I-A-1	20	20,29	7,88	13,04	7,17
	10	15,94	7,17	14,49	7,88
	5	18,84	7,17	11,59	7,17
I-A-2	20	23,19	8,59	13,04	7,88
	10	15,94	7,88	14,49	7,88
	5	17,39	7,88	11,59	7,17
I-B-1	20	18,84	7,88	11,59	7,17
	10	14,49	5,72	11,59	7,88
	5	23,19	7,17	10,14	7,17
I-B-2	20	17,39	8,59	11,59	7,17
	10	14,49	6,43	11,59	7,88
	5	26,09	7,88	10,14	7,17

Tabela 4. Zestawienie najlepszych wyników klasyfikacji wykruszenia wierzchołka zęba koła przekładni pracującej przy jednej prędkości obrotowej wałów i jednym obciążeniu

Nr punktu pracy		1	2	3	4
Typ systemu	Liczba podzakresów	Błąd klasyfikacji [%]			
I-A-1	20	29,79	9,71	19,86	13,49
	10	23,07	9,71	19,86	9,71
	5	33,99	10,81	18,77	9,18
I-A-2	20	31,08	9,71	19,86	13,51
	10	23,07	10,80	19,86	9,71
	5	35,08	10,27	18,77	9,18
I-B-1	20	34,39	9,71	19,81	14,57
	10	19,76	9,71	18,73	9,71
	5	37,50	11,36	16,55	9,18
I-B-2	20	34,14	9,71	19,81	12,95
	10	20,85	11,34	18,73	9,71
	5	36,41	10,27	16,55	9,18

Gdzie nr punktu pracy:

- 1 – $Q = 2,58$ [MPa], $n = 900$ [obr/min],
- 2 – $Q = 2,58$ [MPa], $n = 1800$ [obr/min],
- 3 – $Q = 3,85$ [MPa], $n = 900$ [obr/min],
- 4 – $Q = 3,85$ [MPa], $n = 1800$ [obr/min].

W zależności od typu zastosowanego systemu wykorzystującego logikę rozmytą oraz od sposobu filtracji sygnału drganiowego i wariantu zastosowanej selekcji widma otrzymywano błąd klasyfikacji na poziomach 10-15% dla klasyfikatorów stopnia pęknięcia w stopie zęba oraz 15-20% dla klasyfikatorów stopnia wykruszenia wierzchołka zęba.

Klasyfikatory uzyskiwały największą poprawność wyników dla podziału zakresu częstotliwości $f \in \langle f_o, f_z - f_o \rangle$ na 5 podzakresów.

Porównując uzyskiwaną poprawność diagnozy o stopniu uszkodzenia zęba koła zauważono niewielki wpływ sposobu rozmywania wyjść systemów wykorzystujących logikę rozmytą (porównanie systemów logiki rozmytej typu 1 z 2 – rys. 5 i 6). Dla obu diagnozowanych rodzajów uszkodzeń zębów oraz dla wszystkich wariantów zastosowanego wstępnego przetwarzania sygnałów drganiowych otrzymywano wartości błędów na poziomie do 3%.

Podobne niewielkie różnice w wartościach błędów klasyfikacji występowały przy porównaniu sposobów rozmywania wejść klasyfikatora stopnia pęknięcia w stopie zęba (porównanie systemów logiki rozmytej typu A z B – tabela 1 i 2). Znaczny wpływ na poprawność pracy systemu diagnostycznego miał sposób rozmywania wejść dla klasyfikatorów stopnia wykruszenia wierzchołka zęba. W tym przypadku różnice w uzyskiwanych wartościach błędów dochodziły nawet do 20% na korzyść systemów logiki rozmytej typu A.

Uzyskane w eksperymentach wyniki pokazały, że wybór pomiędzy zaproponowanymi sposobami budowy bazy reguł nie ma wpływu na poprawność pracy klasyfikatorów danego rodzaju uszkodzenia zębów kół przekładni pracującej przy różnych prędkościach obrotowych i momentach obciążenia (porównanie systemów logiki rozmytej typu I z II – rys. 7 i 8).

Zestawienie najlepszych uzyskanych wyników klasyfikacji stopnia uszkodzenia zębów kół przekładni pracującej przy różnych prędkościach obrotowych wałów i różnych obciążeniach przedstawiono w tabeli 5.

Ponieważ uzyskano bardzo dobre wyniki poprawności klasyfikacji dla systemów rozpoznających stopień pęknięcia w stopie zęba, jak również stopień wykruszenia wierzchołka zęba podjęto próby budowy systemu opartego na logice rozmytej, którego celem byłoby rozpoznawanie przez jeden system obu typów uszkodzenia. System taki miał za zadanie rozpoznać stan bezawaryjny, trzy stopnie pęknięcia w stopie zęba oraz cztery stopnie wykruszenia wierzchołka zęba, co było zgodne z przeprowadzoną na stanowisku mocy krążącej FZG rejestracją sygnałów drganiowych.

Najlepsze uzyskane wyniki dla systemu wykorzystującego logikę rozmytą do celów określenia rodzaju i stopnia uszkodzenia zębów kół przekładni pracującej przy różnych prędkościach obrotowych wałów i różnych obciążeniach przedstawia tabela 6.

Tabela 5. Zestawienie najlepszych wyników klasyfikacji uszkodzenia zębów kół przekładni pracującej przy różnych prędkościach obrotowych wałów i różnych obciążeniach

Nr uszkodzenia		1	2
Typ systemu	Liczba podzakresów	Błąd klasyfikacji [%]	
I-A-1	20	11,53	22,45
	10	11,89	19,43
	5	10,08	17,79
I-A-2	20	12,07	21,81
	10	12,43	17,94
	5	10,08	16,86
I-B-1	20	11,35	24,07
	10	12,98	19,60
	5	10,45	16,59
I-B-2	20	11,71	22,24
	10	14,24	20,01
	5	11,17	17,14
II-A-1	20	11,53	22,45
	10	11,89	19,43
	5	10,08	17,79
II-A-2	20	12,07	21,81
	10	12,43	17,94
	5	10,08	16,86
II-B-1	20	11,35	24,07
	10	12,98	19,60
	5	10,45	16,59
II-B-2	20	11,71	22,24
	10	14,24	20,01
	5	11,17	17,14

Gdzie nr uszkodzenia:

- 1 – pęknięcie u podstawy zęba,
2 – wykruszenie wierzchołka zęba.

Tabela 6. Zestawienie najlepszych wyników klasyfikacji rodzaju i stopnia uszkodzenia zębów kół przekładni pracującej przy różnych prędkościach obrotowych wałów i różnych obciążeniach

Typ systemu	Liczba podzakresów	Błąd klasyfikacji [%]
I-A-1	20	23,93
	10	29,36
	5	21,53
I-B-1	20	24,94
	10	30,15
	5	20,65
II-A-1	20	82,39
	10	85,25
	5	87,04
II-B-1	20	82,59
	10	85,55
	5	87,84

Najniższą uzyskaną wartość błędu klasyfikacji wynoszącą 20,65% zanotowano dla systemu typu I-B-1 przy podziale zakresu częstotliwości $f \in \langle f_o, f_z - f_o \rangle$ na 5 podzakresów.

Zastosowane w czasie doświadczeń sposoby wstępnego przetwarzania sygnałów drganiowych nie miały znaczącego wpływu na uzyskiwaną poprawność klasyfikacji rodzaju i stopnia uszkodzenia zęba koła przekładni pracującej z różnymi prędkościami obrotowymi i obciążeniami.

Na podstawie uzyskanych wyników można zauważyć, że największy wpływ na wartość błędu klasyfikacji ma zastosowany sposób budowy bazy reguł. Nawet dziewięciokrotny spadek poprawności uzyskiwanej diagnozy uszkodzenia zębów kół widoczny jest przy porównaniu systemów typu II do systemów typu I wykorzystujących logikę rozmytą. Uzyskane wartości błędu klasyfikacji dla systemów typu II dyskwalifikują ten sposób budowy systemów diagnostycznych. Błąd diagnozy o stanie kół zębatych wydaje być się nawet większy niż prawdopodobieństwo zgadywania o ich stanie.

4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono eksperyment mający na celu budowę klasyfikatora wykorzystującego logikę rozmytą do diagnozowania rodzaju i stopnia lokalnych uszkodzeń zębów kół przekładni. Pracę systemu diagnostycznego oparto na danych pochodzących z sygnałów drgań poprzecznych wału koła poddanych odpowiedniej filtracji oraz selekcji widmowej. Sygnały drganiowe zarejestrowano w czasie pracy rzeczywistej przekładni pracującej na stanowisku mocy krążącej.

Podsumowując można powiedzieć, iż przeprowadzone eksperymenty wykazały możliwość zbudowania poprawnie działających klasyfikatorów rodzaju i stopnia uszkodzenia zębów kół przekładni, wykorzystując do tego celu logikę rozmytą. Równocześnie można zauważyć, że niższy poziom błędu klasyfikacji występował przy diagnozowaniu jednego rodzaju uszkodzenia zębów kół przekładni pracującej w danym punkcie pracy, niż przy równoczesnym diagnozowaniu obu rodzajów uszkodzenia zębów kół przekładni pracującej przy różnych prędkościach obrotowych i obciążeniach. Dlatego też lepszą propozycją wydaje się być zbudowanie systemu diagnostycznego składającego się z wielu wyspecjalizowanych na dany rodzaj uszkodzenia podsystemów tworzących jedną diagnostyczną całość.

LITERATURA

- [1] Adamczyk J., Krzyworzeka P., Cioch W.: *Dynamiczna redukcja niestacjonarności sygnału drganiowego maszyn wirnikowych*. XXIX Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka 2002.
- [2] Cempel C.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe. Warszawa 1989.
- [3] Dalpiaz G., Rivola A., Rubini R.: *Effectiveness and sensivity of vibration processing techniques for local fault detection in gears*. Mechanical Systems and Signal Processing (2000) 14(3), str. 387-412.
- [4] Kacprzyk J.: *Wieloetapowe sterowanie rozmyte*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 2001.
- [5] Korbicz J., Kościelny J., Kowalczyk Z., Cholewa W. (praca zbiorowa): *Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 2002.
- [6] Kościelny J. M.: *Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT. Warszawa 2001.
- [7] Łachwa A.: *Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, reguł i decyzji*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT. Warszawa 2001.
- [8] Łazarz B., Madej H., Wilk A., Figlus T., Wojnar G.: *Diagnozowanie złożonych przypadków uszkodzeń przekładni zębatych*. Biblioteka Problemów Eksploatacji. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2006.
- [9] Łazarz B., Wojnar G., Czech P.: *Wibrometria laserowa i modelowanie – narzędzia współczesnej diagnostyki przekładni zębatych*. Biblioteka Problemów Eksploatacji. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2007.
- [10] Madej H., Wilk A., Łazarz B.: *The application of time-frequency analysis in diagnostics of local damages of toothed gears*. 6th International Conference on Rotor Dynamics. IFToMM. Sydney 2002, str. 706-713.
- [11] Naęcz M., Duch W., Korbicz J., Rutkowski L., Tadeusiewicz R.: *Sieci neuronowe*. Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna, tom 6. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT. Warszawa 2000.
- [12] Piegat A.: *Modelowanie i sterowanie rozmyte. Problemy współczesnej nauki. Teoria i zastosowania*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT. Warszawa 1999.
- [13] Radkowski St.: *Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych*. Biblioteka Problemów Eksploatacji. Warszawa-Radom 2002.
- [14] Randall R. B.: *Detection and diagnosis of incipient bearing failure in helicopter gearboxes*. Engineering Failure Analysis 11 (2004), str. 177-190.
- [15] Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L.: *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa-Łódź 1997.
- [16] Wang W. Q., Ismail F., Golnaraghi M. F.: *Assessment of gear damage monitoring techniques using vibration measurements*. Mechanical Systems and Signal Processing (2001) 15(5), str. 905-922.
- [17] Wilk A., Łazarz B., Madej H., Wojnar G.: *Wibroakustyczne symptomy diagnostyczne w procesach zużyciowych kół zębatych*. X Konferencja Naukowa Wibrotechniki I Wibroakustyki Wibrotech, Kraków 2003.
- [18] Żółtowski B., Cempel C. (praca zbiorowa): *Inżynieria Diagnostyki Maszyn*. Biblioteka Problemów Eksploatacyjnych. Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej. Instytut Technologii Eksploatacji PIB Radom. Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004.



Dr inż. **Piotr CZECH** jest adiunktem w Katedrze Budowy Pojazdów Samochodowych Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej. Rozprawę doktorską pt.: „Wykrywanie uszkodzeń przekładni zębatych za pomocą metod sztucznej inteligencji” obronił z wyróżnieniem. Za wyróżnioną rozprawę doktorską został nagrodzony Nagrodą Prezesa Rady Ministrów oraz Nagrodą Fiata. W pracy naukowej zajmuje się wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji (sieci neuronowych, logiki rozmytej, algorytmów genetycznych) oraz metod przetwarzania sygnałów w diagnostyce elementów układów napędowych.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2006-2009 jako projekt badawczy 4T07B00230.