

THE MULTIDIMENSIONAL DIESEL ENGINE DIAGNOSIS BASED ON THE VIBROACOUSTIC SIGNAL SPECTRUM ANALYSIS

Grzegorz Boruta

*Katedra Mechatroniki, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski
Heweliusza Street 10, 10-719 Olsztyn, Poland
e-mail: g.boruta@uwm.edu.pl*

Marcin Jasiński

*Instytut Podstaw Budowy Maszyn, Politechnika Warszawska
Narbutta Street 84, 02-524 Warszawa, Poland
e-mail: jachuu@simr.pw.edu.pl*

Abstract

Higher and higher exploitation demands given to the equipment and machines from reasons of safety and minimalization of exploitation costs, cause the necessity of the search for the new methods of the damages detection in the diagnosed objects, for example on the base of the vibroacoustics signals analysis. The natural feature of vibroacoustics diagnostics is the possibility for an easy and fast recording of a high figure of strongly redundant vibroacoustics signals and related with this the large surplus of information, which is not utilized in great part, but simultaneously the necessity for the usage of the multidimensional diagnostic vector steps out most often. This causes the necessity diminution of utilized information to the level permitting on design of adequate diagnostic model. One of methods of machines defects diagnose is the correlation of the objective technical condition with diagnostic parameters received from the vibroacoustic signal. Principal Components Analysis (PCA) offers an approach for a linear transformation of those parameters. The redundant information included into those parameters is reduced and the obtained diagnostic model is more reliable.

The product chosen for the investigation presented in this paper is a Diesel engine.

The application of the presented method eliminates the necessity of the performing analytical model which are time consuming and costly. It is possible to diagnose of the engine from objective parameters of the specially prepared vibroacoustic signal without performing simulation models.

Keywords: *Vibroacoustic diagnosis, Principal Components Analysis (PCA), Singular Value Decomposition (SVD), Diesel engine.*

WIELOWYMIAROWA DIAGNOSTYKA SILNIKÓW O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM OPARTA NA BADANIU WIDM SYGNAŁU WIBROAKUSTYCZNEGO

Streszczenie

Coraz wyższe wymagania eksploatacyjne stawiane urządzeniom i maszynom ze względów bezpieczeństwa oraz minimalizacji kosztów eksploatacji, powodują konieczność poszukiwania nowych metod wykrywania uszkodzeń w diagnozowanych obiektach np. na podstawie analizy sygnałów wibroakustycznych. Naturalną cechą diagnostyki wibroakustycznej jest możliwość łatwej i szybkiej rejestracji dużej liczby silnie redundantnych sygnałów wibroakustycznych i związanego z tym dużego nadmiaru informacji, która w znacznej części nie jest wykorzystywana, a równocześnie najczęściej występuje konieczność wykorzystania wielowymiarowego wektora diagnostycznego. Powoduje to konieczność zredukowania wykorzystywanej informacji do poziomu pozwalającego na zbudowanie adekwatnego modelu diagnostycznego. Jedną z metod diagnozowania maszyn jest korelacja obiektywnego stanu technicznego z parametrami diagnostycznymi uzyskanym z sygnału wibroakustycznego. Korzystając z metody składowych głównych (PCA) istnieje możliwość uzyskania liniowego przekształcenia tych parametrów. Pozwala to zredukować redundantną informację zawartą w tych parametrach i uzyskać bardziej wiarygodny model diagnostyczny.

Obiektem wybranym do badań zaprezentowanych w pracy był silnik o zapłonie samoczynnym.

Stosowanie przedstawionej metody eliminuje konieczność wykonywania czasochłonnych i kosztownych modeli analitycznych. Możliwe jest diagnozowanie silnika na podstawie odpowiednio przygotowanego, wymiarowo zredukowanego sygnału wibroakustycznego, bez wykonywania modeli symulacyjnych.

Słowa kluczowe: Diagnostyka wibroakustyczna, analiza składowych głównych (PCA), rozkład macierzy względem wartości własnych (SVD), silnik o zapłonie samoczynnym

1. Wprowadzenie

Coraz wyższe wymagania eksploatacyjne stawiane urządzeniom i maszynom ze względów bezpieczeństwa oraz minimalizacji kosztów eksploatacji, powodują konieczność poszukiwania nowych metod wykrywania uszkodzeń w diagnozowanych obiektach np. na podstawie analizy sygnałów wibroakustycznych. Naturalną cechą diagnostyki wibroakustycznej jest możliwość łatwej i szybkiej rejestracji dużej liczby silnie redundantnych sygnałów wibroakustycznych i związanego z tym dużego nadmiaru informacji, która w znacznej części nie jest wykorzystywana, a równocześnie najczęściej występuje konieczność wykorzystania wielowymiarowego wektora diagnostycznego [3]. Powoduje to konieczność zredukowania wykorzystywanej informacji do poziomu pozwalającego na zbudowanie adekwatnego modelu diagnostycznego.

W tej sytuacji niezbędnym staje się poddanie pierwotnego zbioru parametrów diagnostycznych pewnym transformacjom. Celem tych operacji jest takie przekształcenie pierwotnej wielowymiarowej przestrzeni parametrów diagnostycznych, aby z jednej strony było możliwe dobre rozróżnienie stanów technicznych diagnozowanego silnika, z drugiej zmniejszenie wymiarowości nowej przestrzeni, przy jednoczesnym zachowaniu wystarczającej informacji, niezbędnej do skutecznego diagnozowania. Wymienione postulaty spełnia analiza składowych głównych - PCA (Principal Components Analysis) [6]. PCA, odwołując się do warunku minimalizacji entropii w wielowymiarowym zbiorze danych, przedstawionym w postaci macierzy obserwacji X , pozwala ustalić te główne składowe tego zbioru, które opisując jego podstawowe cechy, umożliwiają jednocześnie zredukowanie wymiaru analizowanego zbioru danych. Tak przekształcony zbiór może w następnym etapie być wykorzystany do budowy empirycznego modelu diagnostycznego [4]. Dzięki macierzowemu zapisowi wyników pomiarów i utworzeniu dla nich macierzy kowariancji oraz żądaniu minimalizacji entropii, zadanie określania składowych głównych zostaje sprowadzone do jej dekompozycji według wektorów własnych. W tym przypadku, zgodnie z sugestią zawartą w pracach [7, 8] przyjmuje się, że wiersze macierzy obserwacji X powinny zawierać kolejne wyniki pomiarów parametrów diagnostycznych (w pracy są to wybrane składowe widmowe sygnałów wibroakustycznych) dla różnych stanów technicznych, natomiast kolumny kolejne parametry. Przetworzoną macierz danych X zdekomponowaną do składowych głównych można zapisać w postaci [7]:

$$\mathbf{X} = \mathbf{Z}\mathbf{U}^T = \sum_{i=1}^m z_i \mathbf{u}_i^T, \quad (1)$$

gdzie:

m - liczba co najwyżej równa mniejszemu wymiarowi macierzy X ,

Z - wektor składowych głównych zawierający składowe główne z_i macierzy X ,

\mathbf{U}^T - macierz zawierająca transponowane wektory własne \mathbf{u}_i^T macierzy kowariancji obliczonej dla macierzy X .

PCA wykorzystuje macierz kowariancji do przeprowadzenia transformacji potencjalnie skorelowanych oryginalnych parametrów diagnostycznych w zbiór nowych zmiennych nieskorelowanych. Okazuje się, że jeśli korelacja oryginalnych parametrów jest wystarczająco duża, to liczba istotnych składowych macierzy obserwacji utworzonej z nowych zmiennych będzie znacznie mniejsza, natomiast badanie pozostałych składowych, w pewnych przypadkach, stwarza możli-

wość wnioskowania o wpływie zaburzeń na rezultaty pomiarów i analizy. Tym samym istnieje możliwość zidentyfikowania parametru lub kombinacji parametrów, najbardziej wrażliwych na zmiany sygnału wywołane powstaniem uszkodzenia.

Do zaimplementowania PCA w budowie modelu empirycznego użyto rozkładu macierzy względem wartości szczególnych - SVD (Singular Value Decomposition). W SVD macierz danych X jest dekomponowana za pomocą następującego równania:

$$X = U\lambda V^T, \quad (2)$$

gdzie:

U - macierz lewostronnych wektorów własnych,

λ - macierz wartości własnych macierzy kowariancji,

V^T - macierz prawostronnych wektorów własnych.

Podstawową zaletą SVD jest to, że wszystkie trzy macierze są uzyskiwane w jednej operacji bez konieczności wyliczenia macierzy kowariancji. Przeprowadzenie PCA za pomocą SVD przeprowadzono w środowisku programu MATLAB.

Przyjęty tok postępowania zweryfikowano w diagnozowaniu silnika o zapłonie samoczynnym przeprowadzając czynny eksperyment diagnostyczny.

2. Eksperyment

Obecnie szczególne miejsce wśród metod diagnostyki tłokowych silników spalinowych zajmują problemy wykrywania usterek wpływających na jakość eksploatacji, w tym na jakość spalania determinującą np. zużycie paliwa, toksyczność spalin czy hałaśliwość. Jakość spalania paliwa w silniku o zapłonie samoczynnym determinują głównie kąt wyprzedzenia i ciśnienie wtrysku oraz dawka paliwa. Badania niezawodności pojazdów napędzanych przez takie silniki pokazują jednocześnie, że usterki właśnie tych parametrów są jednymi najczęściej występujących w trakcie eksploatacji pojazdów [9]. I właśnie te parametry wybrano do prezentowanych badań.

Obiektem badań był rzędowy, sześciocyldrowy, wolnossący silnik typu S359 [5]. Na podstawie identyfikacji obiektu badań ograniczono się do zmiany kąta wyprzedzenia wtrysku do wszystkich cylindrów, dawki paliwa do jednego cylindra i zmiany ciśnienia wtrysku w jednym wtryskiwaczu [1]. Zmianę kąta wyprzedzenia wtrysku realizowano poprzez odpowiednie obracanie wałka pompy wtryskowej względem wałka sprzęgła pompy wtryskowej. Ustawiano jedną z dwu wartości kąta wyprzedzenia wtrysku: wartość nominalną ($18,5^\circ$) lub wartość zmniejszoną (8°). Zmianę dawki paliwa realizowano dla wybranej (drugiej) sekcji tłoczącej poprzez całkowite odłączenie wtryskiwacza od sekcji tłoczącej. Ustawiano jedną z dwu wartości dawki: wartość nominalną lub zerową w całym zakresie prędkości obrotowych wału korbowego. Zmianę ciśnienia wtrysku realizowano dla jednego wtryskiwacza, zasilającego wybrany (drugi) cylinder silnika, poprzez zmianę napięcia sprężyny dociskowej iglicy. Ustawiano jedną z dwu wartości ciśnienia wtrysku: wartość nominalną (21,5 MPa) lub zmniejszoną (10 MPa). W efekcie badania przeprowadzono dla dziewięciu symulowanych stanów technicznych, z których dwa określono jako prawidłowe (Tab. 1).

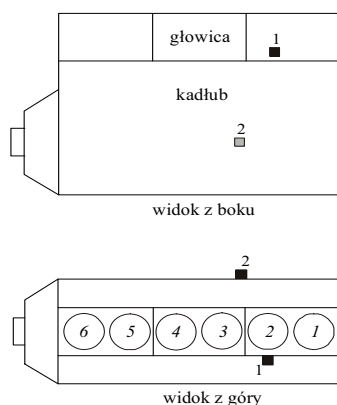
Ze względu na to, że uzyskane wyniki badań mogły by służyć budowie nowej metody diagnozowania silnika, zdecydowano się na prowadzenie badań przy prędkości obrotowej biegu jałowego - naturalnej dla silnika o ZS pracującego podczas diagnozowania eksploatacyjnego. Fabryczne nastawy regulacyjne pomp wtryskowych zapewniają utrzymywanie przez silnik wartości prędkości obrotowej biegu jałowego w zakresie 500-650 obr/min [5].

Badania wykonano na silniku rozgrzanym do temperatur eksploatacyjnych.

Jako miejsca rejestracji sygnałów wibroakustycznych wybrano nadlew technologiczny w osi wału korbowego po prawej stronie silnika oraz płaską powierzchnię głowicy w osi drugiego cylindra tuż przy połączeniu głowicy z kadłubem po lewej stronie silnika [1]. Miejsca te, położone blisko miejsc generacji większości sygnałów wibroakustycznych w tym silniku, schematycznie po-

kazano na Rys. 1. Czujniki drgań mocowano za pomocą połączeń gwintowanych wykonanych w obrębie tych płaskich powierzchni.

Rejestracji sygnałów wibroakustycznych - przebiegów czasowych przyspieszeń drgań prostopadłych do powierzchni montażu czujników, dokonywano za pomocą piezoelektrycznych ładunkowych czujników drgań typu B&K 4384 jednocześnie w obu punktach pomiarowych. Otrzymane sygnały ładunkowe były przetwarzane na sygnały napięciowe i wzmacniane we wzmacniaczu ładunku typu B&K NEXUS. Rejestracji sygnału strobującego dokonywano za pomocą czujnika fotoelektrycznego produkcji Zakładu Elektroniki Pomiarowej Wielkości Nielektrycznych. Wszystkie sygnały rejestrowano i analizowano za pomocą układu analityczno-pomiarowego typu Roadrunner firmy Skalar Instruments. Sygnały rejestrowano przez 5 s (czas ponad 2-krotnie dłuższy od czasu trwania 20 obrotów wału korbowego silnika pracującego na biegu jałowym - ilości obrotów przyjętej do uśredniania synchronicznego), próbując je z częstotliwością 10 kHz. Na ich podstawie wyznaczono dyskretne widma amplitudowo-częstotliwościowe przyspieszeń drgań uśrednionych synchronicznie w zakresie 0-2000 Hz z rozdzielczością około 0,04 Hz (dzięki 250-krotnemu powielaniu otrzymanych uśrednionych przebiegów czasowych sygnałów drganiowych, dającemu ok. 25-cio sekundowe przebiegi czasowe tego sygnału), zależnie od przyjętego czasu trwania jednego obrotu wału korbowego badanego silnika. Konfigurację układu pomiarowego przedstawiono schematycznie na Rys. 2.



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na silniku 1-punkt mocowania czujnika na głowicy silnika, 2-punkt mocowania czujnika na kadłubie silnika,

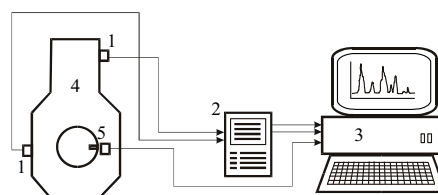
① ÷ ⑥ – cylindry silnika

Fig. 1. Diagram showing location of measurement points in an engine 1-sensor mounted point to engine head, 2-sensor mounted point to engine body,

① ÷ ⑥ – engine cylinders

3. Algorytm wyboru parametrów diagnostycznych

Otrzymane widma uśrednionych synchronicznie sygnałów wibroakustycznych stały się podstawą utworzenia macierzy obserwacji X, gdzie wierszami były pomiary dla kolejno zadawanych uszkodzeń silnika (Tab. 1). Kolumny macierzy X były utworzone z wykorzystaniem składowych widmowych o rzędach przedstawionych w Tab. 2. Dany rząd oznacza wielokrotność



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego 1-czujniki przyspieszeń drgań B&K 4384, 2-wzmacniacz ładunku B&K NEXUS, 3-układ pomiarowo-analityczny Skalar Instruments „Roadrunner”, 4-silnik, 5-czujnik prędkości obrotowej wałkorbowego silnika

Fig. 2. Diagram of a measuring system 1-B&K 4384 vibration acceleration sensors, 2-B&K NEXUS charge amplifier, 3-Skalar Instruments „Roadrunner” measurement-and-analytical system, 4-engine, 5-engine crankshaft rotational speed sensor

częstości obrotów wału korbowego wyznaczonej w trakcie uśredniania synchronicznego sygnałów wibroakustycznych. Przyjęcie tych składowych widmowych wyniknęło ze wstępnej analizy zmienności otrzymanych widm oraz z analizy modeli źródeł generacji i propagacji sygnałów wibroakustycznych w tłokowym silniku spalinowym [1, 2].

Jak wykazano w pracy [4] możliwe jest opracowanie modelu empirycznego na podstawie analizy składowych głównych. Poprzez wybór najbardziej informacyjnych składowych głównych macierzy obserwacji dokonywano redukcji modelu, a tym samym wybierano kilka najbardziej istotnych parametrów, które opisują stan analizowanego obiektu. Zazwyczaj w takich przypadkach większość informacji przenosi kilka pierwszych składowych głównych. Udział j -tej składowej głównej w całkowitej obserwowanej zmienności macierzy obserwacji określany jest zależnością [7, 8]:

$$g_j = \frac{\lambda_j}{\text{tr } \lambda} 100\%, \quad (3)$$

gdzie:

λ_{j-j} - ta wartość własna macierzy kowariancji otrzymanej dla macierzy obserwacji,

$\text{tr } \lambda$ - ślad macierzy wartości własnych macierzy kowariancji otrzymanej dla macierzy obserwacji.

W opisywanych badaniach udział pierwszych trzech składowych głównych w całkowitej obserwowanej zmienności macierzy obserwacji przekracza 94%, zaś tylko pierwszej składowej głównej 80% tej całkowitej obserwowanej zmienności (Rys. 3). Dlatego w dalszej części pracy skupiono się na analizie informacji związanej z pierwszą składową główną macierzy obserwacji.

Aby odpowiednio wykorzystać informację zawartą w składowych głównych ważne jest także określenie parametrów tworzących oryginalną macierz obserwacji mających największy wpływ na kolejne składowe główne. Współczynnik korelacji pomiędzy i -tym parametrem oryginalnym a j -tą składową główną określany jest zależnością [7, 8]:

$$r_{ij} = \frac{u_{ij} \sqrt{\lambda_j}}{s_i}, \quad (4)$$

gdzie:

u_{ij} - elementy wektora własnego u_j macierzy kowariancji otrzymanej dla macierzy obserwacji

λ_{j-j} - ta wartość własna macierzy kowariancji otrzymanej dla macierzy obserwacji,

s_i - odchylenie standardowe i -tego parametru oryginalnego.

Wartości tych współczynników obliczonych dla trzech pierwszych składowych głównych przedstawiono na Rys. 4. Zauważmy, że dla różnych miejsc rejestracji sygnałów wibroakustycznych różny jest stopień skorelowania poszczególnych składowych widmowych tych sygnałów ze składowymi głównymi. Dlatego do budowy modeli diagnostycznych wybrano, indywidualnie dla obu punktów pomiarowych, składowe widmowe najlepiej skorelowane z pierwszą składową główną. Są to:

- dla sygnałów zarejestrowanych na głowicy silnika (Rys. 4a) parametry o numerach 1, 2, 3, 8 i 9, czyli składowe widmowe rzędu 2, 3, 12, 75 i 124,
- dla sygnałów zarejestrowanych na kadłubie silnika (Rys. 4b) parametry o numerach 1, 2, 7, 8 i 9, czyli składowe widmowe rzędu 1, 2, 75, 78 i 124.

Różnice w składzie zbiorów parametrów diagnostycznych najlepiej skorelowanych z kolejnymi składowymi głównymi dla różnych miejsc pomiarowych mogą być związane z różnicami charakterystyk kanałów wibroakustycznych w tłokowym silniku spalinowym.

Zbudowano dwie grupy modeli empirycznych badanego silnika. Pierwszą na podstawie kompletnej macierzy obserwacji (Rys. 5), drugą na podstawie zredukowanej macierzy złożonej z parametrów diagnostycznych najlepiej skorelowanych z pierwszą składową główną, wymienionych powyżej (Rys. 6).

Tab. 1. Wiersze macierzy obserwacji X

Nr wiersza	Opis stanu technicznego
1	Silnik bez uszkodzeń (wyjściowe ustawienie nominalnych wartości parametrów regulacyjnych)
2	Odlączony wtryskiwacz
3	Zmniejszone ciśnienie wtrysku
4	Zmniejszone ciśnienie wtrysku, odlączony wtryskiwacz
5	Zmniejszony kąt wyprzedzenia wtrysku
6	Zmniejszony kąt wyprzedzenia wtrysku, odlączony wtryskiwacz
7	Zmniejszony kąt wyprzedzenia wtrysku, zmniejszone ciśnienie wtrysku
8	Zmniejszony kąt wyprzedzenia wtrysku, zmniejszone ciśnienie wtrysku, odlączony wtryskiwacz
9	Silnik bez uszkodzeń (ponowne ustawienie nominalnych wartości parametrów regulacyjnych)

Tab. 2. Kolumny macierzy obserwacji X

Nr kolumny	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Miejsce wykonania pomiaru:	Rząd składowej widmowej								
na głowicy	2	3	12	15	18	21	24	75	124
na kadłubie	1	2	3	9	21	24	75	78	124

Tab. 1. Lines of the observation space X

Line number	Description of the technical condition
1	Engine without defects (starting settings of nominal values of adjustable parameters)
2	Disconnected injector
3	Reduced injection pressure
4	Reduced injection pressure, disconnected injector
5	Reduced angle of advance of injection
6	Reduced angle of advance of injection, disconnected injector
7	Reduced angle of advance of injection, reduced injection pressure
8	Reduced angle of advance of injection, reduced injection pressure, disconnected injector
9	Engine without defects (resetting of nominal values of adjustable parameters)

Tab. 2. Columns of observation matrix X

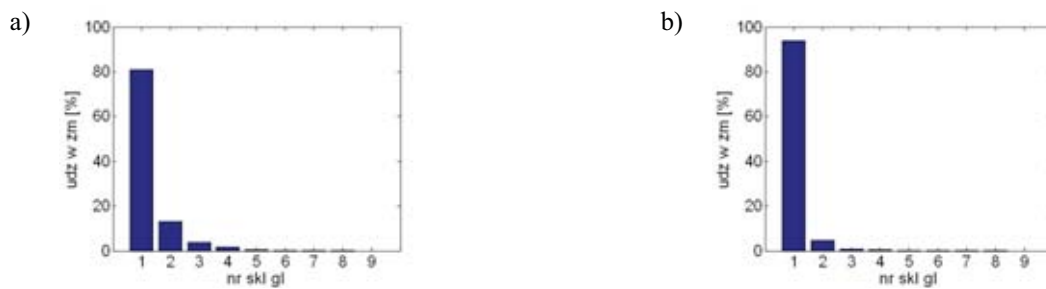
Column number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Place of measurement points	Order of spectral component								
on the head	2	3	12	15	18	21	24	75	124
on the body	1	2	3	9	21	24	75	78	124

Modele empiryczne zbudowane na podstawie kompletnej macierzy obserwacji wyraźnie różnią prawidłowe stany techniczne silnika (nr 1 i 9) od pozostałych, przy czym bardzo jest od nich podobny stan ze zmniejszonym kątem wyprzedzenia wtrysku (nr 5). Te trzy stany techniczne są wyraźnie różne od wszystkich pozostałych, dla których w różnych kombinacjach występują nieprawidłowe wartości dawki i ciśnienia wtrysku paliwa. Zawsze jedno skupienie tworzą też potencjalnie nierozróżnialne stany z zerową dawką paliwa, gdy nieistotne jest ciśnienie wtrysku (nr 2 i 4 dla prawidłowej wartości kąta wyprzedzenia wtrysku i nr 6 i 8 dla nieprawidłowej wartości kąta wyprzedzenia wtrysku). Dla punktu pomiarowego na głowicy silnika dodatkowo z tymi

dwoma parami stanów potencjalnie nierozróżnialnych skupienia tworzą stany z nieprawidłowymi wartościami ciśnienia wtrysku (odpowiednio nr 3 i nr 7). Dla sygnałów zarejestrowanych na silniku pracującym na biegu jałowym występuje więc sytuacja, gdy:

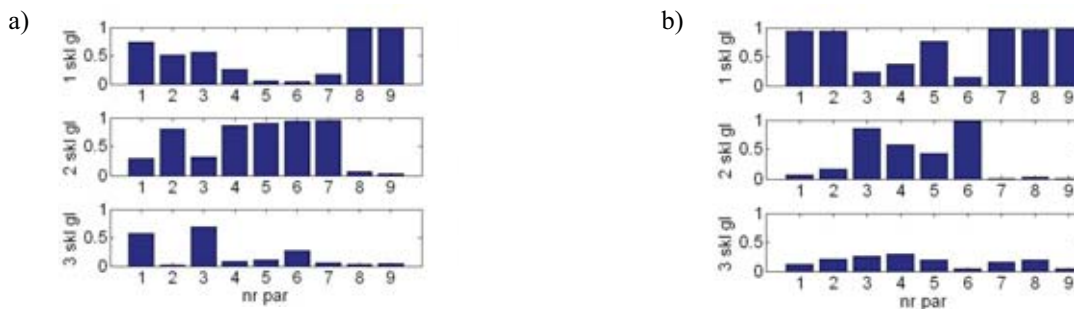
- potencjalnie nierozróżnialne stany tworzą skupienia (1 i 9, 2 i 4, 6 i 8),
- można rozróżnić stany z prawidłowymi (nr 1, 5 i 9) i nieprawidłowymi (pozostałe) wartościami ciśnienia wtrysku i dawki paliwa, i dodatkowo dla sygnałów zarejestrowanych na głowicy - można rozróżnić stany z prawidłową (nr 1 i 9 dla prawidłowych wartości dawki i ciśnienia wtrysku paliwa oraz 2, 3 i 4 dla nieprawidłowych wartości dawki i ciśnienia wtrysku paliwa) i nieprawidłową (nr 5 dla prawidłowych wartości dawki i ciśnienia wtrysku paliwa oraz 6, 7 i 8 dla nieprawidłowych wartości dawki i ciśnienia wtrysku paliwa) wartością kąta wyprzedzenia wtrysku.

Już to może być podstawą do stwierdzenia możliwości zbudowania metody diagnostycznej pozwalającej na wykrycie nieprawidłowych wartości dawki paliwa lub ciśnienia wtrysku paliwa, a być może i wykrycie nieprawidłowych wartości kąta wyprzedzenia wtrysku.



Rys. 3. Udziały kolejnych składowych głównych macierzy obserwacji uzyskanych dla sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych na: a) głowicy, b) kadłubie silnika pracującego na biegu jałowym w całkowitej obserwowanej zmienności tej macierzy

Fig. 3. Shares of main components of observation matrices obtained for vibroacoustic signals registered on: a) the head, b) the body of an engine operating at neutral gear speed in the full observable range of variability of this matrix



Rys. 4. Korelacja poszczególnych parametrów tworzących macierz obserwacji („nr par” - nr składowej widmowej wg tab. 2) z pierwszymi trzema składowymi głównymi tej macierzy uzyskana dla sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych na: a) głowicy, b) kadłubie silnika pracującego na biegu jałowym

Fig. 4. Correlation of individual parameters making up the observation matrix („nr par” - number of the spectral component acc. to Table 2) to the first three main components of this matrix obtained for vibroacoustic signals registered on: a) the head, b) the body of an engine operating at neutral gear speed

Ograniczenie liczby składowych widmowych służących do budowy modeli diagnostycznych do najlepiej skorelowanych z pierwszymi składowymi głównymi macierzy obserwacji pozwoliło na zbudowanie modeli empirycznych dających inną rozróżnialność analizowanych stanów technicznych. Usunięcie składowych widmowych rzędu 15, 18, 21 i 24 dla sygnałów zarejestrowanych na głowicy silnika spowodowało zmniejszenie wzajemnych odległości między stanami technicznymi z prawidłowymi (nr 1, 5 i 9) i nieprawidłowymi wartościami dawki i ciśnienia wtrysku paliwa (nr 2, 3 i 4 oraz 6, 7 i 8) przy jednoczesnym zachowaniu ich wzajemnej odległości od siebie. W nowej, 5-wymiarowej przestrzeni, w porównaniu do pełnej

9-wymiarowej, relatywna rozróżnialność stanów technicznych z prawidłowymi i nieprawidłowymi wartościami dawki i ciśnienia wtrysku paliwa jest więc większa, ale rozróżnialność wewnątrz skupień tworzonych przez stany z nieprawidłowymi wartościami dawki i ciśnienia wtrysku paliwa jest mniejsza oraz praktycznie niemożliwe jest rozróżnienie stanów z prawidłową (stany 1 i 9) i nieprawidłową (stan 5) wartością kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa w przypadku prawidłowych wartości dawki i ciśnienia wtrysku paliwa. Pojęcie relatywnej rozróżnialności oznacza tu rozróżnialność skupień (np. wg rys. 6a zawierających stany nr 1, 5 i 9 oraz stany pozostałe) na tle rozróżnialności stanów wewnątrz tych skupień (np. wg Rys. 6a stanów 1, 5 i 9 między sobą oraz stanów pozostałych między sobą). Podobne zmiany obserwuje się w modelach zbudowanych w oparciu o sygnały zarejestrowane na kadłubie silnika, przy czym dla tego przypadku zmiany względnej rozróżnialności stanów technicznych w starej i nowej przestrzeni (po usunięciu składowych widmowych rzędu 3, 9, 21 i 24) wydają się jeszcze większe.

Powyższa analiza wykazała, że w zależności od miejsca rejestracji sygnałów wibroakustycznych oraz typu uszkodzenia, które jest analizowane, należy odpowiednio dobrać zbiory składowych widmowych - parametrów diagnostycznych, i na ich podstawie budować empiryczne modele diagnostyczne stanu silnika.

5. Wnioski

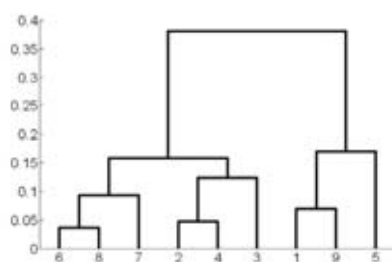
Celem pracy było wykazanie, że możliwe jest diagnozowanie rozwoju uszkodzeń w silniku o zapłonie samoczynnym na podstawie empirycznych modeli diagnostycznych, odwołujących się do informacji o wzajemnych związkach pomiędzy wybranymi miarami sygnałów wibroakustycznych (parametrami diagnostycznymi), przy czym w zależności od warunków eksperymentu czynnego, dominujące są różne parametry diagnostyczne.

Efektom pracy było rozwiązanie następujących zagadnień:

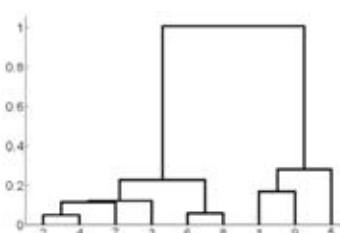
- wykazanie dużej użyteczności PCA w wykrywaniu różnych stanów technicznych tłokowych silników spalinowych;
- eksperymentalne zweryfikowanie opracowanej metody diagnozowania na przykładzie badań laboratoryjnych silnika o zapłonie samoczynnym.

Przedstawiona w pracy metodyka badań pozwala wykorzystać wielowymiarowe macierze obserwacji do tworzenia empirycznych modeli diagnostycznych o zredukowanym wymiarze. Tak skonstruowane modele mimo zredukowanego wymiaru, zachowują fizyczny sens parametrów diagnostycznych i niosą pełną informację diagnostyczną, umożliwiając formułowanie wiarygodnej diagnozy stanu technicznego badanego obiektu.

a)



b)



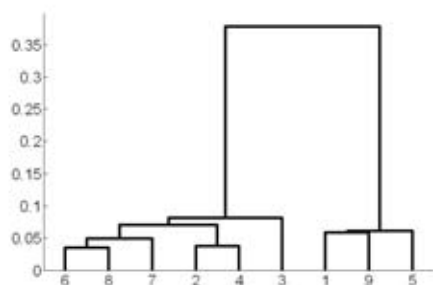
Tab. 1. Nr stanu technicznego wg tab. 1. Technical condition number acc. to Tab.1

Tab. .Nr stanu technicznego wg Tab. 1. Technical condition number acc. to Tab. 1

Rys. 5. Klasteryzacja stanów technicznych na podstawie wszystkich analizowanych składowych widmowych tworzących macierze obserwacji dla sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych na: a) głowicy, b) kadłubie silnika pracującego na biegu jałowym

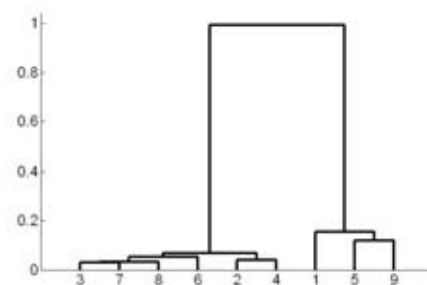
Fig. 5. Clustering of technical conditions based on all the analyzed spectral components making up the observation matrixes for vibroacoustic signals registered on: a) the head, b) the body of an engine operating at neutral gear speed

a)



Tab. 1. nr stanu technicznego wg tab. 1 technical condition number acc. to

b)



Tab. 1. nr stanu technicznego wg tab. 1 technical condition number acc. to

Rys. 6. Klasteryzacja stanów technicznych na podstawie składowych widmowych najlepiej skorelowanych z pierwszymi składowymi głównymi macierzy obserwacji dla sygnałów wibroakustycznych zarejestrowanych na: a) głowicy, b) kadłubie silnika pracującego na biegu jałowym

Fig. 6. Clustering of technical conditions based on the spectral components which are best correlated with the first main components of the observation matrix for vibroacoustic signals registered on: a) the head, b) the body of an engine operating at neutral gear speed

Literatura

- [1] Boruta, G., *Analiza informacji diagnostycznej zawartej w sygnale wibroakustycznym o parametrach regulacyjnych tłokowego silnika spalinowego*. Rozprawa Doktorska, Politechnika Poznańska 2006.
- [2] Boruta, G., *Teoretyczne widmo drgań silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym*, Biul. WAT, rok XL Vol. 9, s. 13-26, 1997.
- [3] Cempel, C., *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. PWN, Warszawa 1989.
- [4] Jasiński, M., *Empiryczne modele w szczegółowej diagnostyce przekładni zębatej*, Rozprawa Doktorska, Politechnika Warszawska 2004.
- [5] Kocia, B., Kukliński, Z., Łukowski, Z., Pałacha, R., Zapłoński, W., *Budowa i naprawa samochodów STAR 266 i pochodnych*, WPM „WEMA”, Warszawa 1988.
- [6] Pearson, K., *On line and planes of closest fit to systems of point in space*, Philosophical Magazine, ser. 6, Vol. 2, 1901, s. 559-572.
- [7] Wise, B., Gallagher, N., *PLS_Toolbox 2.1 for use with MATLAB, Users Manual*, 2000.
- [8] Wise, B., Gallagher, N., *The Process Chemometrics Approach to Process Monitoring and Fault Detection*, J. Proc. Control, Vol. 6, No. 6, s. 329-348, 1996.
- [9] Zespół IPM WAT, *Sprawozdanie końcowe z realizacji pracy naukowo-badawczej na temat Badania eksperymentalne samochodów produkcji FSC - Starachowice. Wyniki eksploatacyjnych badań niezawodności samochodów skrzyniowych STAR-200 z serii próbnej*, WAT, Warszawa 1980.

