

WYKORZYSTANIE ANALIZY SKŁADOWYCH GŁÓWNYCH W DIAGNOSTYCE SILNIKÓW O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

Grzegorz BORUTA, Marcin JASIŃSKI*

Institut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, Wojskowa Akademia Techniczna
ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, gboruta@wat.edu.pl

*Instytut Podstaw Budowy Maszyn, Politechnika Warszawska
ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, jachuu@simr.pw.edu.pl

Streszczenie

Jedną z metod diagnozowania i prognozowania wczesnych faz rozwoju uszkodzeń, jest korelacja obiektywnego stanu technicznego z diagnostycznym parametrem uzyskanym z sygnału wibroakustycznego. Korzystając z metody składowych głównych (PCA) mamy możliwość uzyskania liniowego przekształcenia zmiennych, w związku z czym redundantna informacja jest zredukowana, co pozwala uzyskać bardziej wiarygodny model diagnostyczny.

Obiektem wybranym do badań, prezentowanym w naszym referacie, jest silnik o zapłonie samoczynnym.

Konkludując, metoda przedstawiona w tym referacie unika potrzeby 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).

USE OF THE PRINCIPAL COMPONENTS ANALYSIS IN THE DIESEL DIAGNOSTICS.

Summary

One of method of defects evolution early stages diagnostic and prediction, is the correlation of the objective technical condition with the diagnostic parameter received from the vibroacoustic signal. Principal Components Analysis (PCA) offers an approach for linear transformation of the problem variables so that the redundant information is reduced and the diagnostic model is more easily extracted.

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

To conclude, the method presented here avoids the need for performing analytical model which are time consuming and costly. It is possible to diagnose of engine from the objective parameters of the specially prepared vibroacoustic signal without performing simulation models.

Keywords: Vibroacoustic diagnostic, Principal Components Analysis (PCA), Singular Value Decomposition (SVD).

1. WPROWADZENIE

Coraz wyższe wymagania eksploatacyjne stawiane urządzeniom i maszynom ze względów bezpieczeństwa oraz minimalizacji kosztów eksploatacji, powodują konieczność poszukiwania metod wykrywania uszkodzeń w diagnozowanych obiektach na podstawie sygnałów akustycznych bądź drganiowych.

Szczegółne miejsce wśród metod diagnostyki wibroakustycznej zajmują problemy wczesnego wykrywania uszkodzeń [1,2]. Naturalną cechą diagnostyki wibroakustycznej jest możliwość rejestracji dużej liczby przebiegów drgań i związanego z tym dużego nadmiaru informacji,

która w znacznej części nie jest wykorzystywana, a równocześnie najczęściej występuje konieczność wykorzystania wielowymiarowego wektora diagnostycznego.

W sytuacji, gdy rozkłady prawdopodobieństwa nie są znane, niezbędnym staje się poddanie pierwotnego zbioru parametrów diagnostycznych pewnym transformacjom. Celem tych operacji jest takie przekształcenie pierwotnej przestrzeni parametrów diagnostycznych, aby z jednej strony było możliwe dobre rozróżnienie obserwacji, z drugiej zmniejszenie wymiarowości nowej przestrzeni, przy jednoczesnym zachowaniu wystarczającej informacji, niezbędnej do skutecznego przeprowadzenia klasyfikacji.

Wymienione postulaty spełnia metoda analizy składowych głównych – PCA (Principal Components Analysis), której założenia zostały opracowane przez Karla Pearsona [3] na początku XX wieku.

Metoda PCA, odwołując się do warunku minimalizacji entropii w wielowymiarowym zbiorze danych, pozwala ustalić te główne składowe, które opisując podstawowe cechy zbioru, umożliwiają przeprowadzenie redukcji wymiaru analizowanego zbioru danych. Tak przekształcony zbiór może w następnym etapie być wykorzystany do budowy empirycznego modelu diagnostycznego [4].

Przez macierzowy zapis wyników pomiarów i utworzenie macierzy kowariancji oraz żądanie minimalizacji entropii, zadanie określania składowych głównych zostaje sprowadzone do jej dekompozycji według wektorów własnych. W tym przypadku, zgodnie z sugestią zawartą w pracach [5, 6] przyjmuje się, że wiersze macierzy zawierają kolejne wyniki pomiarów drgań natomiast kolumny kolejne zmienne. Zakładając dodatkowo, że dane zawarte w macierzy \mathbf{X} zostały poddane normalizacji, analizie poddano macierze kowariancji i korelacji utworzone z macierzy \mathbf{X} . Przetworzoną macierz danych \mathbf{X} zdekomponowaną do składowych głównych można zapisać w postaci [6]:

$$\mathbf{X} = \mathbf{Z}\mathbf{U}^T = \mathbf{z}_1\mathbf{u}_1^T + \mathbf{z}_2\mathbf{u}_2^T + \dots + \mathbf{z}_m\mathbf{u}_m^T = \sum_{i=1}^m \mathbf{z}_i\mathbf{u}_i^T \quad (1)$$

gdzie:

m – liczba co najwyżej równa mniejszemu wymiarowi macierzy \mathbf{X} ,

\mathbf{z}_i – wektor składowych głównych,

\mathbf{u}_i^T – wektory własne macierzy kowariancji lub korelacji, obliczonej dla normalizowanej macierzy danych \mathbf{X} .

Do zaimplementowania PCA w budowie modelu empirycznego użyto Singular Value Decomposition (SVD) czyli rozkładu macierzy względem wartości szczególnych. W metodzie SVD macierz danych \mathbf{X} jest zdekomponowana za pomocą następującego równania:

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\boldsymbol{\lambda}\mathbf{V}^T \quad (2)$$

gdzie:

\mathbf{U} – jest to macierz wektorów własnych lewostronnych,

$\boldsymbol{\lambda}$ – macierz wartości własnych,

\mathbf{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 (korelacji), jak było wspomniane wcześniej. Przeprowadzenie PCA za pomocą Singular Value Decomposition przeprowadzono w środowisku programu MATLAB.

Metoda analizy składowych głównych (PCA) wykorzystuje macierz kowariancji (korelacji) do przeprowadzenia transformacji skorelowanych składowych oryginalnych w zbiór nowych zmiennych nieskorelowanych. Okazuje się, że jeśli korelacja składowych oryginalnych jest wystarczająco duża, to liczba istotnych składowych wektora obserwacji utworzonego z nowych zmiennych będzie znacznie mniejsza, natomiast badanie pozostałych składowych, w pewnych przypadkach, stwarza możliwość wnioskowania o wpływie zaburzeń na rezultaty pomiarów i analizy. Tym samym istnieje możliwość zidentyfikowania zmiennej lub kombinacji zmiennych, które są najbardziej wrażliwe na zmiany sygnału wywołane powstaniem uszkodzenia.

Przyjęty tok postępowania zweryfikowano w diagnozowaniu silnika wysokoprężnego przeprowadzając czynny eksperyment diagnostyczny.

2. STANOWISKO POMIAROWE

Obiektem badań był dotarty, rzędowy, sześciocyldrowy, wolnossący silnik o zapłonie samoczynnym typu S359. Silnik ten, o mocy nominalnej 110 kW, jest stosowany między innymi do napędu samochodów ciężarowych STAR z serii 266, produkowanych w Zakładach Starachowickich STAR S.A. [7]. Silnik S359 jest zasilany w paliwo przez rzędową, sześciotłoczkową pompę wtryskową typu P76-15u/M z mechanicznym dwuzakresowym regulatorem prędkości obrotowej typu R8E-20 oraz wyposażony we wtryskiwacze typu W1F-01 z rozpylaczem trzyotworowym typu D1LMK148/1.

W trakcie realizacji pracy zastosowano eksperyment czynny, podczas którego zmieniano parametry stanu technicznego bez demontażu silnika lub z demontażem pewnych elementów, nie zaburzającym jednak głównej struktury silnika. Ograniczono się do zmiany trzech parametrów regulacyjnych: kąta wyprzedzenia wtrysku, dawki paliwa do jednego cylindra i zmiany ciśnienia wtrysku w jednym wtryskiwaczu.

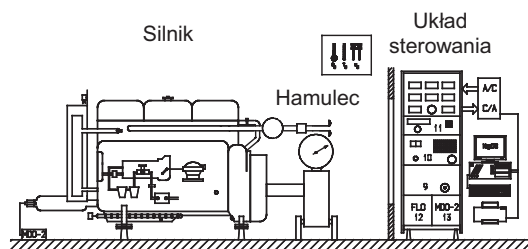
Zmianę kąta wyprzedzenia wtrysku realizowano poprzez odpowiednie obracanie wałka pompy wtryskowej względem wałka sprzęgła pompy wtryskowej [7]. Ustawiano jedną z dwu wartości kąta wyprzedzenia wtrysku: wartość nominalną (18,5°) lub wartość zmniejszoną (8°).

Zmianę dawki paliwa realizowano dla wybranej (drugiej) sekcji tłoczącej w dwojaki sposób. W pierwszym przypadku przez obrócenie tulei regulacyjnej z tłoczkiem w sekcji tłoczącej (powodujące zmianę długości czasu tłoczenia paliwa) [7]. Ustawiano jedną z dwu wartości dawki: wartość nominalną lub zmniejszoną (zerową dla prędkości obrotowej biegu jałowego). W drugim przypadku całkowicie odłączano wtryskiwacz od sekcji tłoczącej. Ustawiano więc jedną z dwu wartości dawki: wartość nominalną lub zerową

w całym zakresie prędkości obrotowych wału korbowego. Ponieważ podczas realizacji badań nie zdecydowano się na demontaż pompy wtryskowej w celu wykonania badań na stole probierczym, stwierdzenie zerowej dawki dla prędkości obrotowej biegu jałowego opierało się na obserwowaniu całkowitego braku tłoczenia paliwa dla tej prędkości obrotowej przez drugą sekcję tłoczącą pompy wtryskowej po zdemontowaniu z niej przewodu wtryskowego.

Zmianę ciśnienia wtrysku realizowano dla jednego wtryskiwacza, zasilającego wybrany (drugi) cylinder silnika, poprzez zmianę napięcia sprężyny dociskowej iglicy [7]. Ustawiano jedną z dwu wartości ciśnienia wtrysku: wartość nominalną (21,5 MPa) lub mniejszą (10 MPa).

Stanowisko hamowniane (rys. 1), na którym prowadzono badania diagnostyczne opisano szerzej w pracy [8]. Daje ono możliwość wyznaczenia wartości parametrów diagnostycznych zwykle wykorzystywanych w diagnozowaniu tłokowych silników spalinowych, także o ZS: wyznaczenia wykresu fazowego, zadymienia spalin, zużycia paliwa, temperatur i ciśnień oleju silnikowego oraz cieczy chłodzącej itd. Wykorzystywane stanowisko hamowniane dawało także możliwość utrzymywania stałego zewnętrznego obciążenia silnika oraz stałej ustalonej prędkości obrotowej jego wału korbowego. Jednak ze względu na to, że uzyskane wyniki badań miały służyć do budowy nowej metody diagnostycznej silnika, zdecydowano się na prowadzenie badań przy prędkościach obrotowych możliwych do osiągnięcia podczas diagnozowania eksploatacyjnego pojazdów (bez demontażu silnika z pojazdu) w warunkach braku zewnętrznego obciążenia, to jest biegu jałowego i maksymalnej regulowanej. Ustalenie braku obciążenia wynikło z faktu, że stosowanie stałych i ściśle określonych obciążeń układu napędowego samochodu podczas badań diagnostycznych wymaga wyposażenia stacji diagnostycznej w hamownię podwoziową, co ze względu na koszt takiej hamowni jest rzadkością.



Rys. 1. Schemat stanowiska hamownianego badania silnika

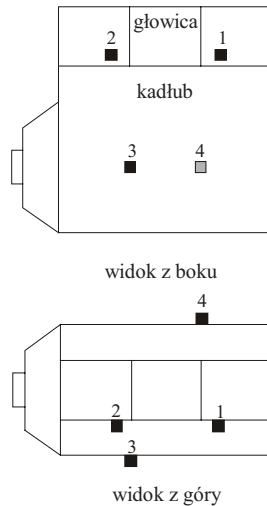
Ustalenie takich warunków pracy było spowodowane też tym, że przy stosowanych w samochodach ciężarowych STAR dwuzakresowych regulatorach prędkości obrotowej w pompach wtryskowych nie jest możliwe ustalenie, w warunkach braku zewnętrznego

obciążenia silnika, pośrednich prędkości obrotowych. Fabryczne nastawy regulacyjne pomp wtryskowych zapewniają utrzymywanie przez silnik wartości prędkości obrotowej biegu jałowego w szerokim zakresie 500÷650 obr/min oraz wartości maksymalnej regulowanej prędkości obrotowej na poziomie ok. 3100 obr/min [7].

Jeżeli chodzi o stan cieplny silnika to przyjęto, że pomiary sygnałów drganiowych będą wykonywane na silniku rozgrzanym do temperatur eksploatacyjnych oraz na silniku zimnym, przy temperaturach cieczy chłodzącej i oleju silnikowego w zakresie 10÷30°C (temperaturach powietrza otaczającego silnik w okresach wiosennym, letnim i jesiennym oraz w ogrzewanych garażach i halach warsztatowych). Przyjęto takie warunki, gdyż z jednej strony pożądane jest wykonywanie badań diagnostycznych silnika w warunkach eksploatacyjnych, z drugiej strony silnika zimnego, bez ewentualnej konieczności rozgrzewania przed badaniami. Ma to szczególnie sens ze względu na ograniczenie zużycia paliwa i uciążliwości badanego pojazdu dla środowiska oraz ze względu na zagrożenie wystąpienia poważniejszych awarii w przypadkach znajdowania się silnika w stanach je poprzedzających. Przyjęcie temperatury 30°C jako bezpiecznej granicy dla przyjmowania stanu cieplnego silnika za zimny wyniknęło z badań własnych, podczas których stwierdzono, że rejestrowane poziomy przyspieszeń drgań można uznać za stałe dla temperatur cieczy chłodzącej nawet do 40°C, szczególnie dla punktów pomiarowych na kadłubie silnika [9].

Jako miejsca rejestracji sygnałów drganiowych wybrano nadlewy technologiczne w osi wału korbowego po obu stronach silnika oraz płaskie powierzchnie głowicy w osi drugiego i piątego cylindra tuż przy połączeniu głowicy z kadłubem po lewej stronie silnika. Miejsca te są położone blisko miejsc generacji większości sygnałów drganiowych w tym silniku. Schematycznie pokazano je na rys. 2. Czujniki drgań mocowano za pomocą połączeń gwintowanych wykonanych w obrębie tych płaskich powierzchni.

Rejestracji przyspieszeń drgań dokonywano za pomocą piezoelektrycznych ładunkowych czujników drgań typu B&K 4384 (użyteczny zakres pomiarowy 0÷6 kHz) jednocześnie we wszystkich punktach pomiarowych. Otrzymane sygnały ładunkowe były przetwarzane na sygnały napięciowe i wzmacniane w czterokanałowym wzmacniaczu ładunku typu B&K NEXUS. Rejestrowano przebiegi czasowe przyspieszeń drgań za pomocą czterokanałowego układu analityczno-pomiarowego typu Roadrunner firmy Skalar Instruments, próbując je z częstotliwością 10kHz, w zakresie 0÷2000 Hz. Przyspieszenia drgań rejestrowano przez 30s dla biegu jałowego i dla prędkości maksymalnej.



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na silniku. 1, 2 – punkty mocowania czujników na głowicy silnika, 3, 4 – punkty mocowania czujników na kadłubie silnika

3. ALGORYTM WYBORU PARAMETRÓW DIAGNOSTYCZNYCH

Sygnaly czasowe uzyskane na przedstawionym wcześniej stanowisku pomiarowym stały się podstawą do utworzenia macierzy obserwacji \mathbf{X} , gdzie wierszami były pomiary dla kolejno zadawanych uszkodzeń silnika (tab. 1).

Tabela 1. Wiersze macierzy obserwacji \mathbf{X} .

Nr wiersza	Opis pomiaru
1	Silnik bez uszkodzeń
2	Obrót tłoczka w sekcji pompy
3	Odlączenie wtryskiwacza
4	Zmienione ciśnienie wtrysku
5	Zmienione ciśnienie wtrysku, obrót tłoczka w sekcji pompy
6	Zmienione ciśnienie wtrysku, odlączenie wtryskiwacza
7	Zmieniony kąt wyprzedzenia wtrysku
8	Zmieniony kąt wyprzedzenia wtrysku, obrót tłoczka w sekcji pompy
9	Zmieniony kąt wyprzedzenia wtrysku, odlączenie wtryskiwacza
10	Zmieniony kąt wyprzedzenia wtrysku, zmienione ciśnienie wtrysku
11	Zmieniony kąt wyprzedzenia wtrysku, zmienione ciśnienie wtrysku, obrót tłoczka w sekcji pompy
12	Zmieniony kąt wyprzedzenia wtrysku, zmienione ciśnienie wtrysku, odlączenie wtryskiwacza

Kolumny macierzy były utworzone z wykorzystaniem poniższych miar diagnostycznych [1, 4] (tab. 2):
- wartość średniego poziomu:

$$\bar{x}_m = x_{AV} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (3)$$

- wartość szczytowa

$$\hat{x} = x_{peak} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T |x(t)|^q dt \right]^{\frac{1}{q}} \text{ dla } q \rightarrow \infty \quad (4)$$

- wartość skuteczna: $\tilde{x} = x_{RMS} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T |x(t)|^2 dt \right]^{\frac{1}{2}}$ (5)

- współczynnik szczytu: $C = \frac{x_{peak}}{x_{RMS}}$ (6)

- kurtoza: $x_{kw} = \frac{1}{T\sigma^4} \int_0^T (x - \bar{x})^4 dt$ (7)

gdzie:

$$\sigma = \left[\frac{1}{T} \int_0^T (x - \bar{x})^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

- współczynnik impulsowości:

$$I = \frac{x_{peak}}{x_{AV}} \quad (9)$$

- współczynnik kształtu: $K = \frac{x_{RMS}}{x_{AV}}$ (10)

- współczynnik luzu: $L = \frac{x_{peak}}{x_{\rho}}$ (11)

gdzie:

$$x_{\rho} = \left[\int_{-\infty}^{\infty} |x|^{\frac{1}{2}} \rho(x) dx \right]^2 \quad (12)$$

Tabela 2. Kolumny macierzy obserwacji \mathbf{X} .

Nr kol.	Parametr diagnostyczny
1	Wartość średnia (3)
2	Wartość szczytowa (4)
3	Wartość skuteczna (5)
4	Współczynnik szczytu (6)
5	Kurtoza (7)
6	Współczynnik impulsowości (9)
7	Współczynnik kształtu (10)
8	Współczynnik luzu (11)
9	Wariancja
10	Moment centralny 3-rzędu
11	Moment centralny 4-rzędu
12	Moment centralny 5-rzędu
13	Moment centralny 6-rzędu
14	Normalizowany moment 3-rzędu (13)
15	Normalizowany moment 4-rzędu (13)
16	Normalizowany moment 5-rzędu (13)
17	Normalizowany moment 6-rzędu (13)

Następne dołączono w postaci kolejnych kolumn: wariancję i centralne momenty wyższych rzędów (od 3 do 6 rzędu) oraz momenty wyższych

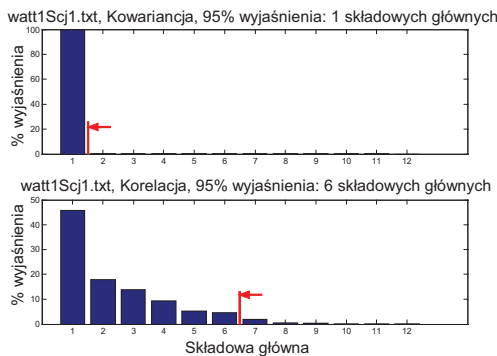
rzędów normalizowane (odpowiednio od 3 do 6 rzędu), obliczane za pomocą poniższego wzoru:

$$\mu_n^k = \frac{\mu^k}{\sigma^k} \quad (13)$$

gdzie:

μ^k – centralny moment k -tego rzędu.

Jak wykazano w pracy [4] możliwe jest opracowanie modelu empirycznego na podstawie analizy składowych głównych. Model empiryczny pozwala podjąć próbę wyjaśnienia istoty fizycznej zjawiska, jakim jest w tym przypadku przesterowanie lub rozwój uszkodzenia silnika o zapłonie samoczynnym. Poprzez wybór najbardziej informacyjnych składowych głównych dokonywano redukcji modelu, a tym samym wybrano kilka najbardziej istotnych parametrów, które opisują stan analizowanego obiektu (rozwoj uszkodzenia). Zazwyczaj w takich przypadkach większość informacji przenosi kilka pierwszych składowych głównych (rys. 3).



Rys. 3. Udziały zmienności kolejnych składowych głównych dla macierzy kowariancji i korelacji

W naszym przypadku ponad 95% informacji przenosi pierwsza składowa główna dla macierzy kowariancji (99,9%), oraz 6 kolejnych składowych dla macierzy korelacji. Związane jest to z dużym wpływem wartości średniej, a co za tym idzie też wariancji na nasze pomiary. W dalszym badaniach przeanalizowano macierz kowariancji, pod kątem informacji o strukturze badanych sygnałów.

Aby w pełni wykorzystać informację zawartą w składowych głównych ważne jest także określenie, parametrów diagnostycznych mających największy wkład w kolejne składowe główne. Po zastosowaniu wzoru:

$$r_{zx} = \left| \frac{u_{ji} \sqrt{\lambda_i}}{\sigma_j} \right| \quad (14)$$

gdzie:

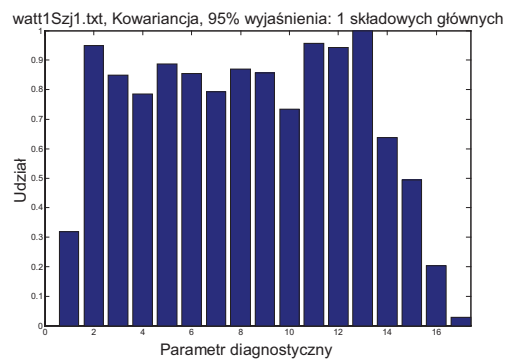
u_{ji} – j -ta wartość i -tego wektora własnego,

λ_i – i -ta wartość własna,

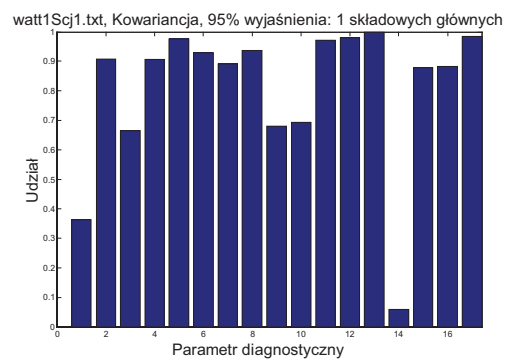
σ_j – j -ta wariancja.

Otrzymano zależności opisujące udziały poszczególnych parametrów diagnostycznych w pierwszej składowej głównej, zarówno dla

silnika ciepłego jak i zimnego oraz dla biegu jałowego i obrotów maksymalnych (rys. 4-7). Analizowano wyniki uzyskane w punkcie pomiarowym nr 1 (czujnik umieszczony na głowicy silnika), ponieważ wyniki dla innych punktów pomiarowych były bardzo podobne (wyjątek stanowił punkt pomiarowy nr 4, który w naszym przypadku nie dawał wiarygodnej informacji diagnostycznej). Zauważmy, że w przypadku biegu jałowego dla silnika zimnego (rys. 4) główny udział w składowej głównej mają parametry związane z wartością szczytową, kurtozą, a w szczególności wyższe momenty centralne (czwartego, piątego i szóstego rzędu).



Rys. 4. Udział poszczególnych parametrów macierzy kowariancji w pierwszej składowej głównej (silnik zimny, bieg jałowy, punkt pomiarowy nr 1)

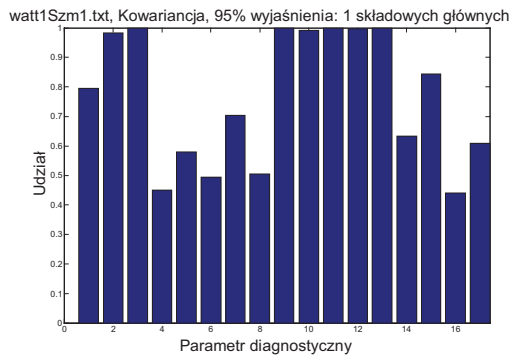


Rys. 5. Udział poszczególnych parametrów macierzy kowariancji w pierwszej składowej głównej (silnik ciepły, bieg jałowy, punkt pomiarowy nr 1)

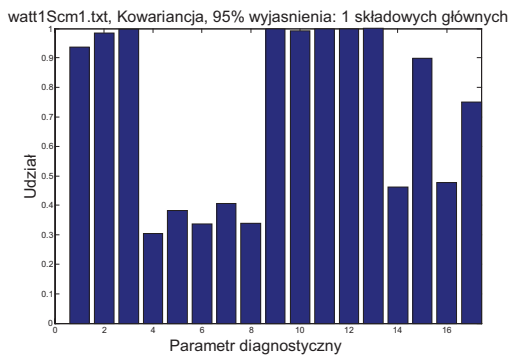
Podobne parametry mają największy udział w składowej głównej dla silnika ciepłego na biegu jałowym (rys. 5), chociaż w tym przypadku dochodzą jeszcze udziały współczynników szczytu, impulsowości i luzu oraz normalizowanego momentu szóstego rzędu.

W przypadku badań przy obrotach maksymalnych, bez względu na stan rozgrzania silnika (rys. 6 i 7), dominujące udziały mają parametry związane z wartością szczytową,

skuteczną oraz z wariancją i momentami centralnymi wyższych rzędów (od trzeciego do szóstego rzędu).



Rys. 6. Udział poszczególnych parametrów macierzy kowariancji w pierwszej składowej głównej (silnik zimny, obroty maksymalne, punkt pomiarowy nr 1)



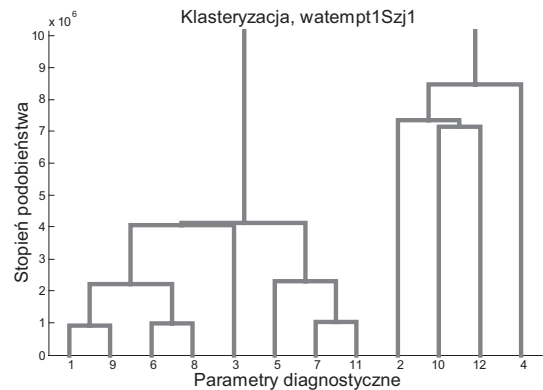
Rys. 7. Udział poszczególnych parametrów macierzy kowariancji w pierwszej składowej głównej (silnik ciepły, obroty maksymalne, punkt pomiarowy nr 1)

Różnice w składzie parametrów diagnostycznych dla każdego typu pomiarów mogą być związane z nieliniowością procesu, jakim jest proces spalania mieszanki w silniku o zapłonie samoczynnym, bardziej uwypukloną w czasie obrotów maksymalnych (wzrost udziału całego spektrum momentów wyższych rzędów, od drugiego do szóstego rzędu).

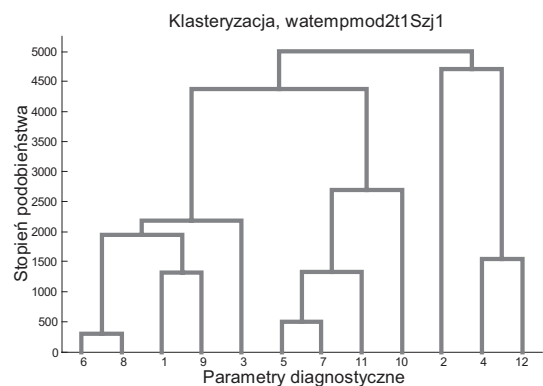
Model empiryczny zbudujemy na podstawie parametrów diagnostycznych mających największy udział w składowej głównej, będą to różne grupy parametrów dla różnych prędkości obrotowych oraz dla stopnia rozgrzania silnika (odpowiednie grupy parametrów zostały omówione wcześniej).

Dla silnika zimnego pracującego na biegu jałowym nie jesteśmy w stanie odróżnić stanu dla silnika dobrego (parametr diagnostyczny nr 1) oraz uszkodzonego (pozostałe parametry – numeracja zgodna z tab. 1) (rys. 8). Niemożliwe jest również podzielenie wyników na grupy skupiające określony typ uszkodzenia. Próba zmiany rodzaju parametrów tj. dodanie wariancji i momentu

centralnego trzeciego rzędu oraz późniejsze usunięcie wartości szczytowej i kurtozy nie zmieniło w sposobie podziału na grupy. Wiąże się to z wyraźną dominacją momentów centralnych piątego i szóstego rzędu w stosunku do innych parametrów. Dopiero usunięcie parametrów związanych z tymi momentami zmieniło podział na grupy (rys. 9), ale mimo to nie poprawiło rozpoznawania uszkodzeń.



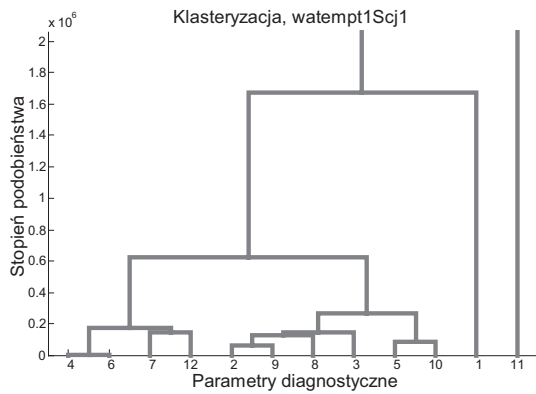
Rys. 8. Klasteryzacja parametrów diagnostycznych (silnik zimny, bieg jałowy, punkt pomiarowy nr 1)



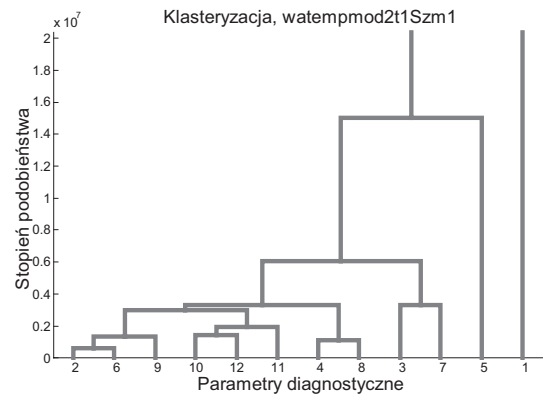
Rys. 9. Klasteryzacja parametrów diagnostycznych bez momentów 5- i 6-rzędowej (silnik zimny, bieg jałowy, punkt pomiarowy nr 1)

Podobną analizę przeprowadzono dla pozostałych pomiarów. Dla silnika ciepłego pracującego na biegu jałowym, bez trudu jesteśmy w stanie odróżnić silnik dobry od uszkodzonego (rys. 10). Podobnie jak w poprzednim wariancie zmiana parametrów nie zmieniła poprawnego rozpoznawania grup (rys. 11).

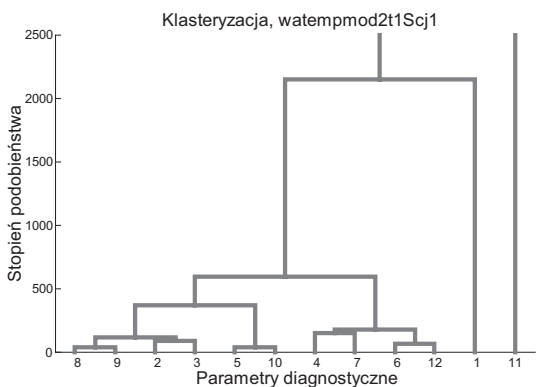
W przypadku silnika zimnego pracującego z prędkością maksymalną, bez problemów jesteśmy w stanie odróżnić silnik dobry od uszkodzonego oraz odróżnić od siebie symulowaną zmianę wartości dawki paliwa, odcięcie wtryskiwacza oraz zmniejszenie ciśnienia wtrysku przy niezmiennych dwóch pozostałych parametrach regulacyjnych (parametry nr 2÷4). (rys. 12).



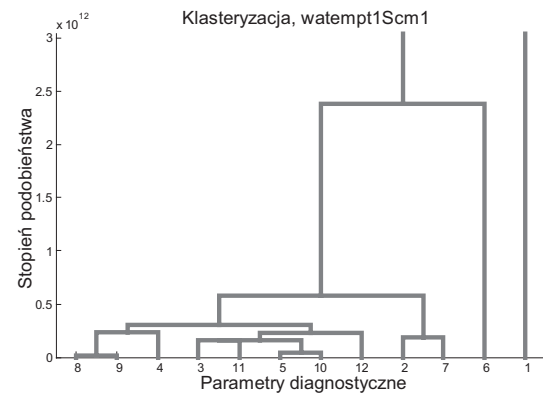
Rys. 10. Klasteryzacja parametrów diagnostycznych (silnik ciepły, bieg jałowy, punkt pomiarowy nr 1)



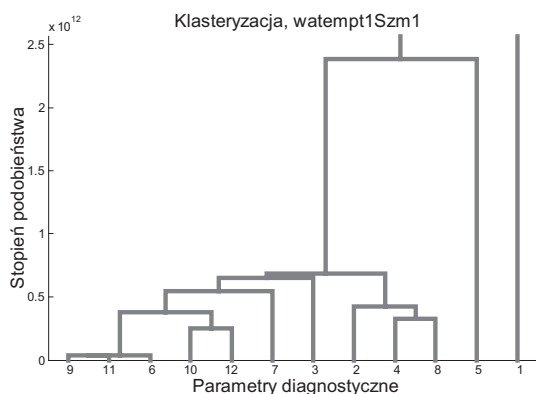
Rys. 13. Klasteryzacja parametrów diagnostycznych bez momentów 5- i 6-rzędu (silnik zimny, obroty maksymalne, punkt pomiarowy nr 1)



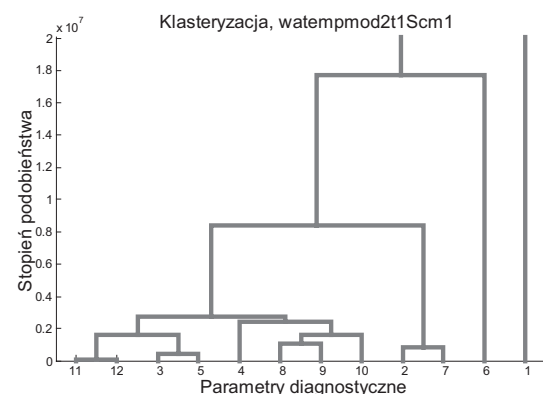
Rys. 11. Klasteryzacja parametrów diagnostycznych bez momentów 5- i 6-rzędu (silnik ciepły, bieg jałowy, punkt pomiarowy nr 1)



Rys. 14. Klasteryzacja parametrów diagnostycznych (silnik ciepły, obroty maksymalne, punkt pomiarowy nr 1)



Rys. 12. Klasteryzacja parametrów diagnostycznych (silnik zimny, obroty maksymalne, punkt pomiarowy nr 1)



Rys. 15. Klasteryzacja parametrów diagnostycznych bez momentów 5- i 6-rzędu (silnik ciepły, obroty maksymalne, punkt pomiarowy nr 1)

Usunięcie parametrów związanych z momentami centralnymi piątego- i szóstego rzędu, umożliwiło dodatkowo jeszcze wydzielenie grupy związanej ze zmianą kąta wyprzedzenia wtrysku, dodatkowo zmniejszonym ciśnieniem wtrysku i zmniejszoną dawką paliwa (parametry nr 10÷12) (rys. 13).

Dla silnika ciepłego przy obrotach maksymalnych, również potrafimy wykryć zaistnienie uszkodzenia oraz odróżnić od siebie podstawowe uszkodzenia (parametry nr 2÷4). (rys. 14). „Wykreślenie” momentów najwyższych rzędów znowu polepszyło rozpoznawanie grup. Tym razem widać grupy związane ze zmienionym

kątem wyprzedzenia wtrysku i dodatkowo dodanym innym typem uszkodzenia (parametry nr 8÷10 oraz nr 11÷12) (rys. 15).

Powyższa analiza wykazała, że w zależności od wartości prędkości obrotowej, stopnia rozgrzania silnika oraz typu uszkodzenia, które jest analizowane, należy odpowiednio dobierać zbiór parametrów diagnostycznych i na tej podstawie zbudować empiryczny model diagnostyczny 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 zmiennymi, przy czym w zależności od warunków eksperymentu czynnego, inne parametry diagnostyczne są dominujące.

Efektom pracy było rozwiązanie następujących zagadnień:

- Wykazanie dużej użyteczności metody PCA w wykrywaniu niestacjonarnych zaburzeń;
- Eksperymentalne zweryfikowanie opracowanej metody diagnozowania na przykładzie badań laboratoryjnych silnika o zapłonie samoczynnym.

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

Otrzymane wyniki mają szczególną wartość ze względu na możliwość wykonywania procedur diagnostycznych w sytuacji, gdy nie ma możliwości przeprowadzenia algorytmu uśredniania synchronicznego i operacyjne zmiany prędkości wynikające z charakterystyki regulatorów muszą być uwzględnione w trakcie analiz diagnostycznych.

LITERATURA

- [1]. Cempel C.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn, PWN, Warszawa, 1989.
- [2]. Radkowski S.: Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych, Instytut Technologii Eksploatacji, Warszawa-Radom, 2002.

- [3]. Pearson K.: On line and planes of closest fit to systems of point in space. Philosophical Magazine, ser. 6, Vol. 2, 1901, str. 559÷572.
- [4]. Jasiński M.: Empiryczne modele w szczegółowej diagnostyce przekładni zębatej. Rozprawa Doktorska, Politechnika Warszawska, 2004.
- [5]. Wise B.M., Gallagher N.B.: The Process Chemometrics Approach to Process Monitoring and Fault Detection. J. Proc. Control, Vol. 6, No 6, 1996, str. 329÷348.
- [6]. Wise B.M., Gallagher N.B.: PLS_Toolbox 2.1 for use with MATLAB. Users Manual, 2000.
- [7]. Kocia B., Kukliński Z., Łukowski Z., Pałacha R., Zapłoński W.: Budowa i naprawa samochodów STAR 266 i pochodnych, WPM „WEMA”, Warszawa, 1988.
- [8]. Boruta G., Trawiński G.: Analiza możliwości wykorzystania zadymienia spalin silnika o zapłonie samoczynnym do diagnozowania jego aparatury wtryskowej, Zag. Ekspł. Masz., Vol. 35, z. 1 (121), 2000, str. 163÷178.
- [9]. Boruta G.: Wpływ warunków pracy tłokowego silnika spalinowego na wartości wybranych estymat sygnału wibroakustycznego, Biul. WAT, rok XLVI, 9, 1997, str. 103÷113.



Mgr inż. Grzegorz BORUTA asystent na Wydziale Mechanicznym Wojskowej Akademii Technicznej. W pracy naukowej i dydaktycznej zajmuje się zagadnieniami związanymi z eksploatacją pojazdów, w tym z diagnostyką techniczną.



Dr inż. Marcin JASIŃSKI asystent w Pracowni Wibroakustyki Instytutu Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Warszawskiej. W pracy naukowej zajmuje się diagnostyką wibroakustyczną i modelami empirycznymi.