

DETEKCJA USZKODZENIA USZCZELKI GŁOWICY SILNIKA ON-LINE NA PODSTAWIE SYGNAŁU DRGAŃ Z WYKORZYSTANIEM ANALIZY SKŁADOWYCH GŁÓWNYCH

Streszczenie

W artykule rozważano możliwość diagnozowania on-line uszkodzenia uszczelki głowicy silnika spalinowego. W systemach diagnozowania on-line wciąż poszukuje się prostszych metod, które umożliwiłyby rozróżnienie stanów dobry – zły oraz identyfikację uszkodzenia. Po zarejestrowaniu sygnału drgań można utworzyć na jego podstawie wiele parametrów diagnostycznych. Część z nich jest użyteczna i niesie informacje o stanie obiektu, część jest skorelowana z innymi, a część zakłóca proces diagnozowania i jest wręcz szkodliwa. Aby wybrać tylko te nośne informacyjnie parametry zastosowano w pracy metodę analizy składowych głównych (Principal Component Analysis) tworząc model empiryczny pozwalający na automatyczną klasyfikację uszkodzeń uszczelki głowicy silnika na podstawie sygnału drgań.

WSTĘP

Sprężanie w cylindrze może spowodować uszkodzenie uszczelki głowicy, zwłaszcza w silnikach z głowicami aluminiowymi, które mają znacznie większą rozszerzalność cieplną niż stalowe, co z kolei powoduje większy nacisk na uszczelkę. Producenci próbują przeciwdziałać temu dodając powłokę teflonową zapobiegającą przywieraniu głowicy do uszczelki. W razie uszkodzenia uszczelki mogą pojawić się różne problemy jak utrata kompresji (co prowadzi do zmniejszenia mocy silnika) lub wdmuchiwanie spalin do układu chłodzenia, co powoduje przegrzanie silnika i jego zwiększone zużycie. Płyn chłodzący może przeciekać do cylindrów powodując obecność pary w spalinach i uszkodzenie katalizatora. Uszkodzona uszczelka głowicy może również spowodować przedmuchi między cylindrami. Jazda z uszkodzoną uszczelką głowicy (jeśli to możliwe) może spowodować dodatkowe znaczne zniszczenia na skutek przegrzania lub utraty smarowania [1].

Uszkodzenie uszczelki głowicy jest jednocześnie jednym z uszkodzeń mechanicznych, które w większości przypadków jest niewykrywalne przez system OBD (ang. On-Board Diagnostics), co zostało stwierdzone podczas badań w warunkach eksploatacyjnych. Jest to również jedno z uszkodzeń mechanicznych elementów silnika spalinowego, którego uszkodzenie powoduje zmianę w sygnale drgań głowicy. Diagnozowanie tego uszkodzenia na podstawie analizy sygnału drgań różnymi metodami opisano m.in. w [2-4]. O ile inne uszkodzenia mechaniczne np. zaworów wylotowych oraz spalanie stukowe można wykrywać stosując selekcję sygnału drganiowego w dziedzinie czasu, w tym przypadku jest to metoda nieskuteczna.

Przedstawiona w artykule metoda jest nieinwazyjna, szybka i łatwa w realizacji, a tym samym umożliwia diagnozowanie w czasie jazdy samochodem. Po zarejestrowaniu sygnału drgań można utworzyć na jego podstawie wiele parametrów diagnostycznych. Część z nich jest użyteczna i niesie informacje o stanie obiektu, część jest skorelowana z innymi, a część zakłóca proces diagnozowania i jest wręcz szkodliwa. Aby wybrać tylko te nośne informacyjnie parametry zastosowano w pracy metodę analizy składowych głównych (ang. Principal Component Analysis -PCA) tworząc model empiryczny pozwalający na automatyczną klasyfikację mechanicznych uszkodzeń silnika na podstawie sygnału drgań. Metoda została

opisana w [5]. Znalazła zastosowanie w diagnostyce maszyn [6-10]. Opisana metoda ma za zadanie uzupełnienie działającego już w samochodach systemu On-board Diagnostics (OBD), które jest nastawione na wykrywanie uszkodzeń emisyjnych, o system diagnozowania uszkodzeń mechanicznych. Może również zostać rozszerzona o inne uszkodzenia mechaniczne.

1. OPIS EKSPERYMENTU

Obiektem badań był układ napędowy Fiata Punto, którego dane techniczne zestawiono w tabeli 1.

Tab.1. Podst. dane techniczne badanego zespołu napędowego

Typ silnika	FIRE 1.2 MPI, benzynowy, 4-cylindrowy, 8-zaworowy
Średnica cylindra	70,8 mm
Skok tłoka	78,9 mm
Pojemność skokowa	1242 cm ³
Stopień sprężania	9,8
Ciśnienie sprężania	1,15 MPa
Moc maksymalna	54 kW przy 6000 obr/min
Moment maksymalny	106 Nm przy 4000 obr/min
Skrzynia przekładniowa	5-biegowa
Sprzęgło	jednotarczowe, suche

Eksperyment przeprowadzono podczas prób drogowych dla stałych prędkości obrotowych oraz obciążeń dla rozgrzanego silnika (temperatura cieczy chłodzącej 95°C). Rejestrowano sygnały [11]:

- przyspieszenia drgań głowicy silnika przy 1. cylindrze w kierunku pionowym i poziomym oraz sygnały synchronizujące:
- z czujnika położenia wału korbowego,
- zapłonu w 1. cylindrze,
- położenia przepustnicy.

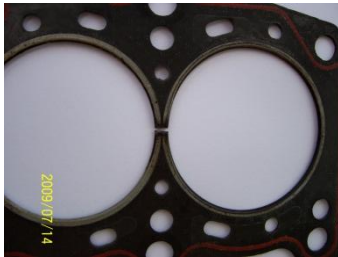
Przyspieszenia drgań głowicy silnika były przetwarzane przy pomocy czujników Bruel & Kjaer DeltaShear typ 4393 o zakresie częstotliwości 0,1-16500 Hz, częstotliwości rezonansowej 55 kHz i temperaturze pracy od -74 do 250°C, zamocowanych przy pomocy połączenia gwintowego. Pozostałe sygnały przyspieszenia drgań układu napędowego ze względu na węższy zakres częstotliwości badanego sygnału były przetwarzane przy pomocy czujników Bruel & Kjaer typ IEPE nr 4514. Sygnały rejestrowano przy pomocy prze-

nośnego urządzenia do rejestracji danych Bruel & Kjaer PULSE typ 3560E z częstotliwością próbkowania 65536 Hz.

Sygnały o czasie trwania około 1 minuty rejestrowano podczas jazdy po drodze ekspresowej ze stałymi prędkościami 2000, 3000 i 4000 obr/min bez gwałtownych zmian obciążenia silnika, gwałtownego przyspieszania i hamowania. Gwałtowne zmiany prędkości obrotowej mają znaczący wpływ na amplitudę drgań. Wpływ obciążenia nie jest tak bardzo znaczący [12]. Sygnał położenia wału korbowego oraz sygnał cewki napięciowej umożliwiły identyfikację cykli pracy silnika, momentów zapłonu oraz faz rozrządu.

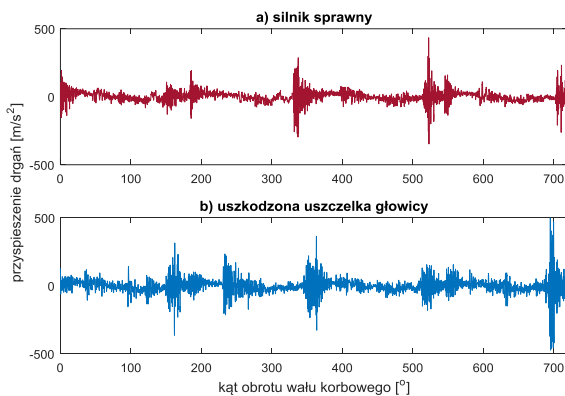
Eksperyment czynny polegał na rejestracji sygnałów w warunkach symulowanych uszkodzeń mechanicznych zespołu napędowego naśladujących te, które są często diagnozowane w warsztatach samochodowych.

Symulację pęknięcia uszczelki zasymulowano wykonując nacięcie widoczne na rys. 1.



Rys. 1. Uszkodzenie uszczelki głowicy.

Na rys.2 przedstawiono chwilowe przebiegi drgań głowicy silnika podczas jednego cyklu pracy (2 obroty wału korbowego) dla oryginalnej i przeciętej uszczelki. Drgania rejestrowane były z częstotliwością 65536 Hz, a więc wykorzystano częstotliwość rezonansową czujnika.



Rys. 2. Wartości chwilowe przyspieszenia drgań głowicy silnika w kierunku pionowym przy prędkości 3000 obr/min z a) oryginalną uszczelką i b) uszkodzoną uszczelką głowicy silnika zarejestrowane dla jednego cyklu pracy silnika (2 obroty wału korbowego)

Na przebiegu czasowym przyspieszenia drgań widać zmiany jakościowe oraz niewielkie zmiany ilościowe podczas pracy silnika z uszkodzoną uszczelką. Można powiedzieć, że uszkodzenie powoduje wzmocnienie odpowiedzi drganiowej.

2. SELEKCJA PARAMETRÓW DIAGNOSTYCZNYCH

Opisane wyżej sygnały czasowe zarejestrowane podczas jazdy samochodem stały się podstawą do utworzenia macierzy obserwacji. Wykorzystano następujące parametry:

- Wartość średnia sygnału $x(t)$

$$x_{AV} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |x(k)| \quad (1)$$

gdzie:

N – liczba próbek w sygnale

- Wartość skuteczna sygnału $x(t)$

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x^2(k)} \quad (2)$$

- Wartość międzyszczytowa

$$x_{PP} = \max(x(t)) - \min(x(t)) \quad (3)$$

- Wariancja

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x(k) - \bar{x})^2 \quad (4)$$

gdzie:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x(k)$$

- Współczynnik szczytu

$$C = \frac{x_{PP}}{x_{RMS}} \quad (5)$$

- Współczynnik kształtu

$$WK = \frac{x_{RMS}}{\frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{|x(t)|} dt} \quad (6)$$

- Współczynnik impulsowości

$$WI = \frac{x_{PP}}{\frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{|x(t)|} dt} \quad (7)$$

- Współczynnik asymetrii (skośność)

$$WA = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - \bar{x})^3 dt}{\left(\frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - \bar{x})^2 dt \right)^{3/2}} \quad (8)$$

- Współczynnik spłaszczenia (kurtoza)

$$K = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - \bar{x})^4 dt}{\left(\frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - \bar{x})^2 dt \right)^2} \quad (9)$$

Parametry te obliczane mogą być on-line pod warunkiem jazdy z względnie stałą prędkością, bez gwałtownego przyspieszania i hamowania. Każdy z parametrów wyznaczany jest dla przyspieszenia drgań w kierunku pionowym i poziomym. Ponieważ badane parametry charakteryzują się dużą zmiennością z cyklu na cykl zastosowano filtr cyfrowy opisany wzorem rekurencyjnym:

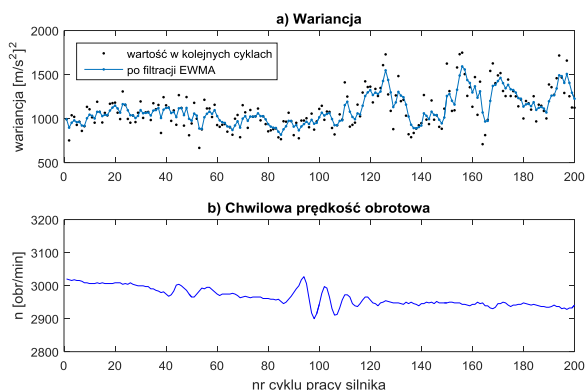
$$\bar{x}_k = F \cdot \bar{x}_{k-1} + (1 - F)x_k \quad (10)$$

gdzie:

- \bar{x}_k - bieżąca uśredniona wartość obliczona po k cyklach,
- \bar{x}_{k-1} - średnia wartość parametru obliczona po $k-1$ cyklach,
- x_k - bieżąca wartość parametru,
- F - stała filtru.

Powyższe równanie znane jest jako uśrednianie cyfrowe z eksponencjalną wagą EWMA (ang. Exponentially Weighted Moving Average) i jest sposobem na eliminację grubych odchyłek pomiarowych. Gdy stała filtru $F \rightarrow 1$ wartość bieżąca zależy tylko od poprzednich próbek. W przeciwnym przypadku, gdy $F \rightarrow 0$, filtrowanie nie jest wykonywane i $\bar{x}_k = x_k$.

Na rys.3 przedstawiono, jak zmienia się wariancja obliczona dla kolejnych 200 cykli pracy silnika. Parametr ten porównano dla danych zarejestrowanych w dziedzinie czasu (rys.3a). Punkty oznaczają wartość wariancji obliczoną dla pojedynczego cyklu, a linią ciągłą zaznaczono wartości po przeliczeniu przez filtr EWMA ze współczynnikiem $F=0.6$. Na rys.3b przedstawiono chwilową prędkość obrotową.



Rys. 3. a) Zmiana wariancji sygnału przyspieszenia drgań w ciągu 200 cykli pracy silnika (wartość obliczona i przefiltrowana przez filtr EWMA), b) zmiana prędkości obrotowej w ciągu tych samych 200 cykli pracy silnika.

Ponieważ łatwiej i szybciej jest obliczać on-line parametry diagnostyczne dla oryginalnych danych w dziedzinie czasu, bez ich wcześniejszego przepróbkowania, a analiza wykazała pomijalne błędy przy niewielkich wahaniach prędkości obrotowej, wszystkie działania wykonywane były na sygnale drgań w dziedzinie czasu.

Utworzono macierz parametrów uczących X , której kolumnami były wektory parametrów diagnostycznych obliczonych w kierunku poziomym i pionowym dla jednego cyklu pracy silnika, a wierszami - parametry w kolejnych 200 cyklach pomiarowych dla każdego stanu silnika (silnik sprawny oraz uszkodzona uszczelka głowicy). Użytko w ten sposób macierz 18×400 . Następnie estymowano macierz kowariancji wektorów parametrów uczących z zależności [13]:

$$R_{xx} \cong \frac{1}{1200} XX^T \quad (11)$$

oraz dokonano dekompozycji tej macierzy według wartości własnych. Wartości własne λ_i oraz skojarzone z nimi wektory własne w_i powiązane są zależnością:

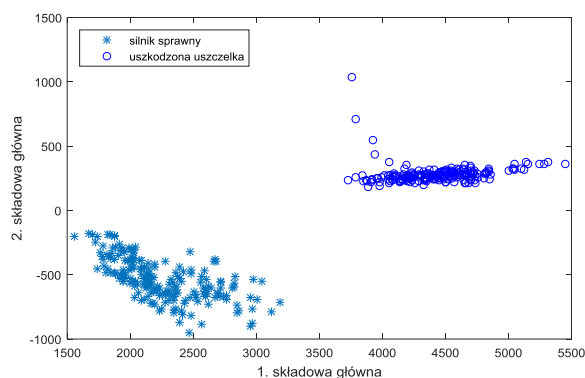
$$R_{xx} w_i = \lambda_i w_i \quad (12)$$

Transformacja PCA jest przekształceniem liniowym, pozwalającym na zachowanie najważniejszych informacji dotyczących oryginalnego procesu x w zredukowanej przestrzeni danych wyjściowych y :

$$y = W \cdot x \quad (13)$$

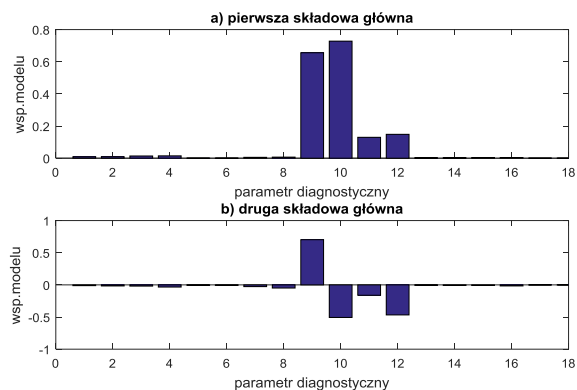
Ze względu na dominację dwóch pierwszych wartości własnych λ_1 i λ_2 nad pozostałymi w dalszej analizie wykorzystano dwa pierwsze wiersze macierzy W czyli dwie pierwsze składowe główne y_1 i y_2 , wyznaczone z zależności (13).

Na rys.4 przedstawiono klasyfikację uszkodzeń silnika w oparciu o dwie składowe główne. Klasyfikacji dokonano metodą najbliższych sąsiadów [7,13] i uzyskano 100% rozróżnienia.



Rys. 4. Klasyfikacja uszkodzenia uszczelki głowicy na podstawie dwóch pierwszych składowych głównych.

W zaproponowanej metodzie wektory w_1 i w_2 stanowią więc empiryczny model diagnostyczny silnika. Ich wartości zostały zilustrowane na rys.5.



Rys.5. Parametry modelu diagnostycznego a) dla 1. składowej głównej, b) dla 2. składowej głównej. Parametry: 1,2 – wartość średnia (w kier.pionowym i poziomym), 3,4 – wartość skuteczna, 5,6 – skośność, 7,8 – kurtosa, 9,10 – wariancja, 11,12 – wartość międzyszczytowa, 13,14 – współczynnik szczytu, 15,16 – wsp. impulsowości, 17,18 – współczynnik kształtu.

Z analizy wynika, że największy udział w składowych głównych mają wariancja oraz wartość międzyszczytowa w obydwu kierunkach. Dla nowego zredukowanego modelu wynik klasyfikacji nie zmienił się, a model diagnostyczny można zapisać w postaci równań:

$$PC1 = 0,65 \cdot \sigma_v^2 + 0,73 \cdot \sigma_h^2 + 0,13 \cdot x_{\max v} + 0,15 \cdot x_{\max h} \quad (14)$$

$$PC2 = 0,70 \cdot \sigma_v^2 - 0,51 \cdot \sigma_h^2 - 0,16 \cdot x_{\max v} - 0,47 \cdot x_{\max h}$$

gdzie:

$PC1, PC2$ – odpowiednio pierwsza i druga składowa główna,

σ_v^2, σ_h^2 – wariancja sygnału drgań odpowiednio w kierunku pionowym i poziomym,

$x_{\max v}, x_{\max h}$ – wartość szczytowa sygnału drgań odpowiednio w kierunku pionowym i poziomym.

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono metodę wstępnego rozpoznawania uszkodzeń silnika spalinowego, która została zweryfikowana dla silnika Fiata Punto 1.4 z zapłonem iskrowym. Metoda wykorzystuje parametry statystyczne sygnału drganiowego silnika. Ponieważ zauważono, że przy użyciu tej metody przepróbkowanie (resampling) nie wpływa na wynik klasyfikacji, można wykorzystać oryginalny sygnał czasowy. Ma to wpływ na łatwość implementacji i szybkość obliczeń, co jest ważne podczas diagnozowania on-line. Zastosowano metodę Principal Component Analysis (PCA) w celu redukcji wektora parametrów diagnostycznych. Przeanalizowano wpływ poszczególnych parametrów na udział składowych głównych. Wyeliminowano redundancję informacyjną. Wykazano, że dla zredukowanego wektora parametrów diagnostycznych wynik klasyfikacji jest nawet lepszy niż dla pełnego wektora branego wcześniej pod uwagę. Rozważano wstępnie rozszerzenie wektora parametrów o momenty centralne wyższych rzędów, ale zrezygnowano z nich ze względu na ich dużą zmienność z cyklu na cykl pracy silnika, co pociągało za sobą zwiększenie rozrzutu parametrów wewnątrz klasy i pogorszenie jakości klasyfikacji. Rozrzuty wewnątrz klas można zmniejszać obniżając wartość współczynnika F filtru EWMA, tracąc jednocześnie chwilowe zmiany parametrów. W rezultacie opracowano empiryczny model statystyczny uwzględniający dwa parametry diagnostyczne – wariancję oraz wartość międzyszczytową sygnału przyspieszenia drgań w kierunku pionowym i poziomym, pomnożone przez współczynniki wagowe, które zostały dobrane metodą PCA. Model ten pozwala na rozróżnienie dobrego stanu technicznego silnika od stanu uszkodzenia uszczelki głowicy ze 100% pewnością. Model może być dalej rozwijany dla innych uszkodzeń. Metoda ta opracowana została z myślą o uzupełnieniu systemu OBD o rozpoznawanie uszkodzeń mechanicznych na podstawie sygnału wibroakustycznego.

BIBLIOGRAFIA

1. Węgiel S., Wiśniewski K., Zawadzki J., *Uszczelki głowicy silnika*, Poradnik serwisowy, Kompendium praktycznej wiedzy warsztatowej, nr 6 / 2004.
2. Komorska I., *Detection of the engine head gasket defects on the basis of vibration signal*, Combustion Engines 3/2011 (146).
3. Czech P., *Wykorzystanie probabilistycznych sieci neuronowych i sygnałów drganiowych do diagnozowania uszkodzenia uszczelki pod głowicą silnika ZS*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: TRANSPORT z. 78, 2013 r., s.39-45.
4. Ling D., Song W., Sun R., *Metoda przewidywania niezawodności elementów składowych silnika diesla oparta na analizie przyczyn i skutków uszkodzenia FMEA*, Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability 2011, 1: s.63-68.
5. Jolliffe I. T., *Principal Component Analysis*, Springer, New York, 2002.
6. He Q., Yan R., Kong F., Du R., *Machine condition monitoring using Principal Component representations*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.23, Issue 2, 2009, p. 446-466.

7. Dybala J., Radkowski S., *Geometrical method of selection of features of diagnostic signals*, Mechanical Systems and Signal Processing Vol.21, Issue 2, 2007, p. 761-779.
8. Zimroz R, Bartkowiak A., *Investigation on Spectral Structure of Gearbox Vibration Signals by Principal Component Analysis for Condition Monitoring Purposes*, 9th International Conference on Damage Assessment of Structures (DAMAS 2011), Journal of Physics: Conference Series, Vol. 305, 2011.
9. Ahmed M., Gu F. Ball A., *Fault Detection and Diagnosis using Principal Component Analysis of Vibration Data from a Reciprocating Compressor*. 18th International Conference On Automation And Computing (ICAC), 2012. IEEE, Cardiff, UK, p. 461-466.
10. Antory D., Kruger U., Irwin G.W., McCullough G. *Fault Diagnosis in Internal Combustion Engines Using Nonlinear Multivariate Statistics*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I Journal of Systems and Control Engineering, Vol. 219, Issue 4, 2005, p. 243-258.
11. Komorska I., *Vibroacoustic diagnostic model of the vehicle drive system*, Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom, 2011.
12. Komorska I, *Analiza sygnału drgań silnika o zapłonie iskrowym w warunkach drogowych*, Archiwum Motoryzacji nr 3/2009, s.181-190
13. Osowski S.: *Metody i narzędzia eksploracji danych*, Wyd. BTC, Legionowo 2013.

ON-LINE DETECTION OF THE ENGINE HEAD GASKET DEFECTS ON THE BASIS OF VIBRATION SIGNAL WITH PRINCIPAL COMPONENTS ANALYSIS

Abstract

Paper discussed the possibility of on-line diagnosis the defect of the head gasket of the combustion engine. In systems of on-line diagnostics the simpler methods - which would allow to differentiate good and faulty states as well as the defects identification - are constantly searched for. When the vibration signal is recorded several diagnostic parameters can be created on its bases. A part of them is useful and provides information of the object state, a part is correlated with other data, however there is also a part which disturbs the diagnostic process. In order to select parameters carrying information the method of the Principal Component Analysis (PCA) was applied forming the empirical model allowing for an automatic classification of defects of the engine head gasket on the bases of the vibration signal.

Autor:

dr hab. inż. **Iwona Komorska** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, Zakład Mechatroniki Samochodowej, e-mail: iwona.komorska@uthrad.pl