

Piotr CZECH¹, Grzegorz WOJNAR², Piotr FOLEGA³

WIBROAKUSTYCZNA DIAGNOSTYKA NIESPRAWNOŚCI UKŁADU ZAPŁONOWEGO SAMOCHODU Z WYKORZYSTANIEM ESTYMAT AMPLITUDOWYCH

Streszczenie. W badaniach wibroakustycznych silników ważnym zagadnieniem jest właściwa interpretacja złożonych sygnałów pomiarowych przez zastosowanie odpowiednich metod ich przetwarzania. Do głównych zadań w diagnozowaniu można zaliczyć separację użytecznego sygnału wibroakustycznego oraz wybór charakterystycznych cech przetworzonego sygnału wrażliwych na uszkodzenia. W artykule przedstawiono próbę wykrywania zakłóceń w układzie zapłonowym samochodu przez pomiar drgań oraz hałasu. Obiektem badań był czterocylindrowy silnik spalinowy o pojemności 1,2 dm³ samochodu volkswagen polo, dodatkowo przystosowany do zasilania paliwem alternatywnym w postaci gazu LPG.

Słowa kluczowe: diagnostyka, drgania, hałas, silniki spalinowe

VIBROACOUSTIC DIAGNOSING OF DISTURBANCES IN THE CAR IGNITION SYSTEM BY AMPLITUDE ESTIMATES

Summary. An important issue in vibroacoustic examination of engines is a correct interpretation of complex measured signals by applying property methods of their processing. The main tasks in diagnostics include: separation of a useful vibroacoustic signal and selection of characteristic, damage-sensitive features of the processed signal. The paper presents an attempt of detecting disturbances in the ignition system by measuring vibrations and noise. The object of the tests was a four-cylinder engine of a Volkswagen Polo car with swept capacity 1,0 dm³, adjusted to alternative power supply with the use of LPG gas fuel.

Keywords: diagnostics, vibrations, noise, combustion engines

1. WSTĘP

Na podstawie obrazu sygnału wibroakustycznego w dziedzinie czasu można jakościowo ocenić proces wibroakustyczny ze względu na stopień determinizmu, okresowości,

¹ Wydział Transportu, Politechnika Śląska, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, tel. (+48 32) 6034230, e-mail: piotr.czech@polsl.pl

² Wydział Transportu, Politechnika Śląska, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, tel. (+48 32) 6034193, e-mail: grzegorz.wojnar@polsl.pl

³ Wydział Transportu, Politechnika Śląska, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, tel. (+48 32) 6034193, e-mail: piotr.folega@polsl.pl

wystąpienia bądź niewystąpienia pewnych fragmentów procesu oraz ich związku z innymi zdarzeniami występującymi w obiekcie [2]. Przykładowo, analizując przebieg drgań kadłuba silnika w korelacji do przebiegu obrazującego położenie wału korbowego, można zauważyć, że zjawiska mają charakter prawie deterministyczny, okresowy i występują w ścisłym związku z kinematyką badanego silnika [4, 6, 8]. W przypadku gdy znany jest okres powtarzania się zjawiska, można zastosować uśrednianie synchroniczne. W wyniku tego procesu wszystkie składowe nieokresowe są eliminowane z sygnału razem z szumem. W celu wykrycia uszkodzenia wybranych elementów diagnozowanego obiektu należy określić ich okres obrotu oraz okres, z jakim uszkodzenia będą generowały zaburzenia mierzonego sygnału [1, 2, 13]. Wykorzystanie w tym przypadku uśredniania synchronicznego w odpowiednio dobranym okresie spowoduje zmniejszenie wpływu zaburzeń niezwiązanych z występującymi uszkodzeniami. Analizując sygnał nieuśredniony, trzeba pamiętać, że może on zawierać wiele składowych występujących przypadkowo, niezwiązanych z pracą diagnozowanych par kinematycznych. Analizę tego typu sygnałów stosuje się zwykle w przypadku, gdy uzyskanie sygnału synchronizującego jest trudne lub wręcz niemożliwe.

2. OPIS BADAŃ

W przeprowadzonych badaniach sprawdzano możliwość wykorzystania miar amplitudowych wyznaczonych na podstawie sygnałów w dziedzinie czasu do diagnozowania niesprawności układu zapłonowego objawiającej się w postaci braku iskry zapłonowej świecy.

Obiektem badań był czterocylindrowy, czterosuwowy silnik samochodu volkswagen polo o pojemności skokowej $1,0 \text{ dm}^3$ z zapłonem iskrowym, przystosowany do alternatywnego zasilania paliwem gazowym LPG. W trakcie badań rejestrowano położenie kątowe wału korbowego i wałka rozrządu, przyspieszenie drgań korpusu silnika w kierunku równoległym i prostopadłym do osi cylindra oraz ciśnienie akustyczne. Badania wykonano dla prędkości obrotowych silnika wynoszących 850 obr/min (bieg jałowy), 2400 obr/min, 2850 obr/min oraz 3400 obr/min. Eksperymenty zrealizowano dla silnika zasilanego benzyną oraz gazem LPG.

Doświadczenia powtarzano dla silnika pracującego bez uszkodzeń oraz przy braku iskry zapłonowej na cylindrze: pierwszym, drugim, trzecim, czwartym, pierwszym i czwartym oraz drugim i trzecim równocześnie.

Charakter zmian występujący w dziedzinie czasu zarejestrowanych sygnałów wibroakustycznych został opisany przez miary amplitudowe w postaci: wartości średniej, wartości skutecznej, energii sygnału, wartości międzyszczytowej, współczynnika szczytu, współczynnika luzu, współczynnika kształtu, współczynnika impulsowości, współczynnika asymetrii, kurtozy.

Miary diagnostyczne wyznaczano w następujący sposób:

- dla zarejestrowanego przebiegu czasowego przy danej prędkości obrotowej, przy danym zasilaniu oraz danym stanie silnika obliczano miary dla każdego cyklu oddzielnie,
- następnie dla każdej miary wyznaczano wartość średnią, minimalną, maksymalną oraz różnicę pomiędzy tymi wartościami, biorąc pod uwagę wszystkie cykle w danej próbie.

Aby móc stwierdzić przydatność danej miary do celów diagnostycznych, oprócz wrażliwości na dane uszkodzenie musi się ona charakteryzować powtarzalnością wartości dla danych warunków pracy obiektu i jego stanu. Najlepszą miarą byłaby taka, która przy danych parametrach zawsze dawałaby tę samą wartość. Dla odmiany najgorszym przypadkiem jest

sytuacja, gdy oprócz dużych wahań wartości dochodzi jeszcze zmiana znaku miary z dodatniej na ujemną.

Po obliczeniu wszystkich miar diagnostycznych analizowano wartości średnie danej miary dla wszystkich stanów silnika. Na podstawie przeprowadzonych analiz starano się odpowiedzieć na następujące pytania:

- czy na podstawie którejs z miar można zdiagnozować jeden z dwóch stanów silnika (brak niesprawności, brak iskry zapłonowej na jednym lub dwóch cylindrach)?,
- czy na podstawie którejs z miar można zdiagnozować jeden z trzech stanów silnika (brak niesprawności, brak iskry zapłonowej na jednym cylindrze, brak iskry zapłonowej równocześnie na dwóch cylindrach)?,
- czy na podstawie którejs z miar można zdiagnozować jeden z siedmiu analizowanych stanów silnika (brak niesprawności, brak iskry zapłonowej na 1., 2., 3., 4. cylindrze, brak iskry zapłonowej równocześnie na 2. i 3., oraz 1. i 4. cylindrze)?,
- jaki wpływ na miary diagnostyczne mają rodzaj paliwa oraz prędkość obrotowa silnika?

3. WYNIKI BADAŃ

Na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego można stwierdzić następujące fakty:

- żadna z miar diagnostycznych nie pozwala zdiagnozować jednego z siedmiu stanów silnika zarówno przy zasilaniu silnika benzyną, jak i gazem LPG,
- żadna z miar diagnostycznych nie pozwala rozpoznać jednego z trzech stanów silnika,
- spośród zaprezentowanych miar amplitudowych można wskazać te, które pozwalają na rozpoznanie jednego z dwóch stanów silnika. Zaliczyć do nich można:
 - w przypadku zasilania benzyną
Miary diagnostyczne, takie jak: wartość skuteczna, energia sygnału, wartość międzyszczytowa, pozwalają jednoznacznie ocenić dwa stany silnika niezależnie od prędkości obrotowej. Współczynnik asymetrii pozwala ocenić dwa stany silnika jedynie wówczas, gdy silnik pracuje na biegu jałowym oraz przy prędkości obrotowej $n=2850$ obr/min;
 - w przypadku zasilania gazem LPG
Dla tego typu zasilania nie można wskazać miary diagnostycznej, która niezależnie od prędkości obrotowej silnika wskaże jeden z dwóch stanów silnika. Poszczególne miary są użyteczne tylko przy określonych prędkościach obrotowych. Dla biegu jałowego względnie dobrą miarą jest wartość międzyszczytowa. Gdy silnik wykazuje niesprawność, wartość tego współczynnika spada o ok. 15% lub więcej w stosunku do w pełni sprawnego. Dla prędkości obrotowej $n=2400$ obr/min nie można wskazać miary, która rozpozna brak iskry zapłonowej na jednym lub dwóch cylindrach. Wartość skuteczna, energia sygnału oraz wartość międzyszczytowa wskazują jedynie uszkodzenie w przypadku braku iskry zapłonowej na jednym cylindrze. Gdy wystąpi brak zapłonu na dwóch cylindrach, współczynniki te są bezużyteczne (ich wartości są takie same jak dla sprawnego silnika). Dla prędkości obrotowej $n=2850$ obr/min miary, tj.: wartość skuteczna, energia sygnału, wartość międzyszczytowa, potrafią rozpoznać jeden z trzech stanów silnika (brak uszkodzenia, brak iskry zapłonowej na jednym cylindrze, brak iskry zapłonowej na dwóch cylindrach). Dla prędkości obrotowej $n=3400$ obr/min występuje analogiczna sytuacja do przypadku $n=2400$ obr/min;

- pozostałe miary diagnostyczne (wartość średnia, współczynnik szczytu, współczynnik luzu, współczynnik kształtu) nie nadają się do oceny stanu silnika pod względem wypadania zapłonów,
- przy zasilaniu gazem LPG można zauważyć zmniejszenie wartości energii sygnału niezależnie od prędkości obrotowej dla wszystkich rodzajów uszkodzeń,
- wartości międzyszczytowe dla prędkości obrotowych $n=2850$ obr/min, 3400 obr/min przy zasilaniu LPG ulegają zmniejszeniu w stosunku do zasilania benzyną niezależnie od rodzaju uszkodzenia.

Na podstawie analiz wyników uzyskanych dla sygnałów przyspieszenia drgań kadłuba silnika w kierunku osiowym można stwierdzić:

- żadna z miar diagnostycznych nie pozwala na trafną ocenę jednego z siedmiu stanów silnika,
- żadna z miar diagnostycznych nie pozwala ocenić jednego z trzech stanów silnika,
- można wskazać miary diagnostyczne, które pozwalają ocenić jeden z dwóch stanów silnika:
 - dla zasilania benzyną

Do miar, które niezależnie od prędkości obrotowej potrafią wskazać dwa stany silnika, można zaliczyć wartość skuteczną i energię sygnału. Istnieją również miary, dzięki którym można rozpoznać dwa stany silnika, jednak są one uzależnione od prędkości obrotowej; dla biegu jałowego są to: wartość średnia, wartość międzyszczytowa, współczynnik asymetrii, dla $n=2400$ obr/min są to: wartość średnia, współczynnik szczytu, współczynnik impulsowości, kurtoza, dla $n=2850$ obr/min są to: wartość międzyszczytowa, współczynnik szczytu, współczynnik impulsowości, kurtoza, dla $n=3400$ obr/min są to: wartość międzyszczytowa, współczynnik szczytu, współczynnik impulsowości, kurtoza;
 - dla zasilania gazem LPG

Dla tego rodzaju zasilania nie można wskazać miar, dzięki którym możliwe by było rozpoznanie jednego z dwóch stanów silnika niezależnie od prędkości obrotowej. W porównaniu z zasilaniem benzynowym miary diagnostyczne, tj. wartość skuteczną, energia sygnału, nie potrafią rozpoznać w każdym przypadku wypadania zapłonów występującego równocześnie na dwóch cylindrach (przy $n=2400$ obr/min i 2850 obr/min). Dla biegu jałowego miarami, które rozpoznają jeden z dwóch stanów, są: wartość skuteczną, energia sygnału, dla $n=2400$ obr/min użytecznymi miarami są jedynie: współczynnik impulsowości, kurtoza, dla $n=2850$ obr/min są to: wartość skuteczną, współczynnik szczytu, współczynnik impulsowości, kurtoza, dla $n=3400$ obr/min są to: wartość skuteczną, energia sygnału, wartość międzyszczytowa;
- w przypadku zasilania gazem LPG zmniejszeniu uległa liczba miar, za pomocą których możliwe jest diagnozowanie jednego z dwóch stanów pracy silnika,
- miary takie jak współczynnik luzu i współczynnik kształtu nie nadają się do celów diagnostycznych.

Na podstawie analiz przyspieszeń drgań kadłuba silnika w kierunku prostopadłym można stwierdzić:

- żadna z miar diagnostycznych nie jest w stanie wskazać jednoznacznie jednego z siedmiu stanów silnika,
- żadna z miar diagnostycznych nie jest w stanie wskazać jednoznacznie jednego z trzech stanów silnika,

- spośród wymienionych miar można wskazać te, które rozpoznają jeden z dwóch stanów silnika:
 - dla zasilania benzyną
Dla tego rodzaju zasilania można wskazać miary, dzięki którym można rozpoznać stan pracy silnika niezależnie od prędkości obrotowej. Są to: wartość skuteczna, energia sygnału, wartość międzyszczytowa. Najbardziej widoczną różnicą jest to, że wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wartości poszczególnych miar dla poszczególnych uszkodzeń rosną, jednak nie ma to wpływu na trafność diagnozowania. Ponadto można wskazać miary, które są skuteczne tylko przy pewnych prędkościach obrotowych:
 - na biegu jałowym: wartość średnia,
 - dla $n=2400$ obr/min: wartość średnia, współczynnik asymetrii,
 - dla $n=2850$ obr/min: współczynnik asymetrii,
 - dla zasilania gazem LPG
Dla tego rodzaju zasilania jedyną miarą, która jest niezależna od prędkości obrotowej, jest energia sygnału. Ponadto dla poszczególnych prędkości obrotowych można wskazać miary, które również rozpoznają jeden z dwóch stanów silnika:
 - dla $n=2400$ obr/min: wartość skuteczna, współczynnik asymetrii,
 - dla $n=2850$ obr/min: wartość skuteczna, wartość międzyszczytowa, współczynnik asymetrii,
 - dla $n=3400$ obr/min: wartość skuteczna, wartość międzyszczytowa, współczynnik asymetrii;
- dla zasilania gazem LPG różnice pomiędzy wartościami dla sprawnego silnika i uszkodzonego są dużo mniejsze aniżeli przy zasilaniu benzyną, jednak poszczególne wartości miar diagnostycznych są większe,
- do celów diagnostycznych nie nadają się miary: współczynnik szczytu, współczynnik luzu, współczynnik kształtu, współczynnik impulsowości, kurtoza.

4. PODSUMOWANIE

W licznych ośrodkach naukowych na całym świecie prowadzi się różnego typu badania związane z układami przeniesienia napędu [1-8, 10, 12, 13]. Pośród tych badań można wyróżnić te, które bezpośrednio są związane z wykorzystaniem zjawisk wibroakustycznych do celów diagnostycznych elementów układów przeniesienia napędu [1-6, 8, 13]. Niniejszy artykuł przedstawia próbę zastosowania estymat amplitudowych sygnałów wibroakustycznych do określenia stanu technicznego układu zapłonowego silnika spalinowego pojazdu samochodowego.

Reasumując przedstawione w artykule badania, można stwierdzić, że za pomocą zastosowanych miar diagnostycznych możliwe jest jedynie rozpoznanie jednego z dwóch stanów pracy silnika – brak i wystąpienie niesprawności w postaci braku zapłonu w cylindrze.

Można również zauważyć, że w przypadku zasilania silnika gazem LPG maleje liczba miar, które można wykorzystać do diagnozowania.

Najbardziej uniwersalnymi miarami są wartość skuteczna i energia sygnału. Dla zasilania benzyną wymienione miary sprawdziły się dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów diagnostycznych. W przypadku zasilania gazem LPG miar tych nie można było wykorzystać do wszystkich sygnałów – dla sygnałów akustycznych, przyspieszeń prostopadłych i osiowych sprawdzały się jedynie przy wybranych prędkościach obrotowych silnika.

Miary takie jak współczynnik luzu i współczynnik kształtu nie zostały wykorzystane w żadnym z przypadków do wskazania uszkodzenia.

Należy zaznaczyć, że pod uwagę brano te miary, dla których wartości pomiędzy stanem sprawności silnika a jego niesprawnością różniły się minimum o ok. 20%. Wartości poszczególnych miar różniące się wartością o mniej niż 20% uznawano za mało wiarygodne.

Wnioski z otrzymanych badań nie wykluczają możliwości zastosowania miar opisujących charakter zmian sygnałów wibroakustycznych w dziedzinie czasu jako danych wejściowych dla klasyfikatorów neuronowych. Z założenia odpowiednio nauczone klasyfikatory oparte na sieciach neuronowych należących do metod sztucznej inteligencji potrafią sobie radzić z analizą wielowymiarowych danych – czego nie jest w stanie uczynić człowiek [3, 9, 11].

Bibliografia

1. Bartelmus W., Zimroz R.: A new feature for monitoring the condition of gearboxes in nonstationary operating conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 23, 2009, p. 1528-1534.
2. Cempel C.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1989.
3. Czech P., Łazarz B., Wojnar G.: Wykrywanie lokalnych uszkodzeń zębów kół przekładni z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych i algorytmów genetycznych. ITE, Radom 2007.
4. Czech P., Madej H.: Application of cepstrum and spectrum histograms of vibration engine body for setting up the clearance model of the piston-cylinder assembly for RBF neural classifier. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance And Reliability*, No. 4, 2011, p. 15-20.
5. Dąbrowski Z., Komorska I., Puchalski A.: Diagnostowanie błędów wykonania i montażu układów wirujących. Biblioteka Problemów Eksploatacji. ITE, Radom 2001.
6. Figlus T.: Diagnosing the engine valve clearance, on the basis of the energy changes of the vibratory signal. *Maintenance Problems*, Vol. 1, 2009, p. 75-84.
7. Grega R., Homišin J., Kaššay P., Krajňák J.: The analyse of vibrations after changing shaft coupling in drive belt conveyer. *Zeszyty Naukowe, s. Transport, z. 72*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011, p. 23-31.
8. Madej H., Czech P.: Discrete wavelet transform and probabilistic neural network in IC engine fault diagnosis. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance And Reliability*, No. 4, 2010, p. 47-54.
9. Osowski S.: Sieci neuronowe do przetwarzania informacji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
10. Puškár M., Bigoš P., Puškárová P.: Accurate measurements of output characteristics and detonations of motorbike high-speed racing engine and their optimization at actual atmospheric conditions and combusted mixture composition. *Measurement*, Vol. 45, 2012, p. 1067-1076.
11. Tadeusiewicz R.: Sieci neuronowe. Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa 1993.
12. Urbanský M., Homišin J., Krajňák J.: Analysis of the causes of gaseous medium pressure changes in compression space of pneumatic coupling. *Transactions of the Universities of Košice*, Vol. 2, 2011, p. 35-40.
13. Zuber N., Ličen H., Klačnja-Miličević A.: Remote online condition monitoring of the bucket wheel excavator SR1300 – a case study. *Facta Universitatis. Series: Working and Living Environmental Protection*, Vol. 1(5), 2008, p. 25-37.