

Tomasz FIGLUS

DIAGNOZOWANIE LUZÓW ZAWOROWYCH SILNIKA Z ZAPŁONEM SAMOCZYNNYM

Streszczenie. W pracy przedstawiono badania, których celem jest diagnozowanie zwiększonego luzu zaworowego silnika spalinowego z zapłonem samoczynnym. W eksperymentach stanowiskowych prowadzono pomiary przyśpieszenia drgań silnika spalinowego, w którym modelowano powiększony luz zaworu dolotowego i wylotowego. W celu poszerzenia możliwości diagnostyki ww. uszkodzenia wykonywano także pomiary i analizy hałasu, mierząc ciśnienie akustyczne w pobliżu silnika.

Na podstawie zarejestrowanych sygnałów przeprowadzono ich analizę stosując uśrednianie i filtrację oraz wyznaczając energię, a także rozkłady czasowo-częstotliwościowe Wignera-Ville'a.

DIAGNOSING OF VALVE CLEARANCE OF THE DIESEL ENGINE

Summary. The paper presents test results, whose aim is diagnosing of valve clearance increase in a combustion diesel engine. Acceleration of the engine vibration was measured in laboratory tests of the engine, in which clearance of intake and exhaust valves was increased. In order to widen diagnosis possibility of this valve clearance, noise was also measured and analysed by teaking acoustic preasure near the engine.

On the basis of recorded signals, an analysis was made using average and signal filtration and as the next step energy was counted, as well as Wigner-Ville time-frequency decomposition.

1. WSTĘP

Pomiary i analizy sygnałów wibroakustycznych maszyn należą do jednych z podstawowych badań prowadzonych w celu określenia ich stanu technicznego. Rozwój metod badań umożliwia ich coraz szerszą implementację na inne obiekty, również na silniki spalinowe.

Istotnym problemem występującym w diagnostyce silników spalinowych są ograniczone możliwości określania stanu ich podzespołów mechanicznych. Główny problem spotykany w tym przypadku, to brak nowych, bezinwazyjnych metod opracowanych w celu określenia wartości powiększonych ponadnormatywnie luzów, jak też wykrywanie ewentualne uszkodzenia, np. automatycznych kasowników luzu zaworowego [1-5]. Pracy silnika w takich przypadkach towarzyszą np. zwiększony hałas czy też niepokojące stuki oraz występować może obniżenie mocy i zwiększone zużycie paliwa.

Stosowane obecnie w układach diagnostyki pokładowej oprogramowanie umożliwia badanie zmiany wartości prądowych oprzyrządowania elektronicznego silnika. System taki

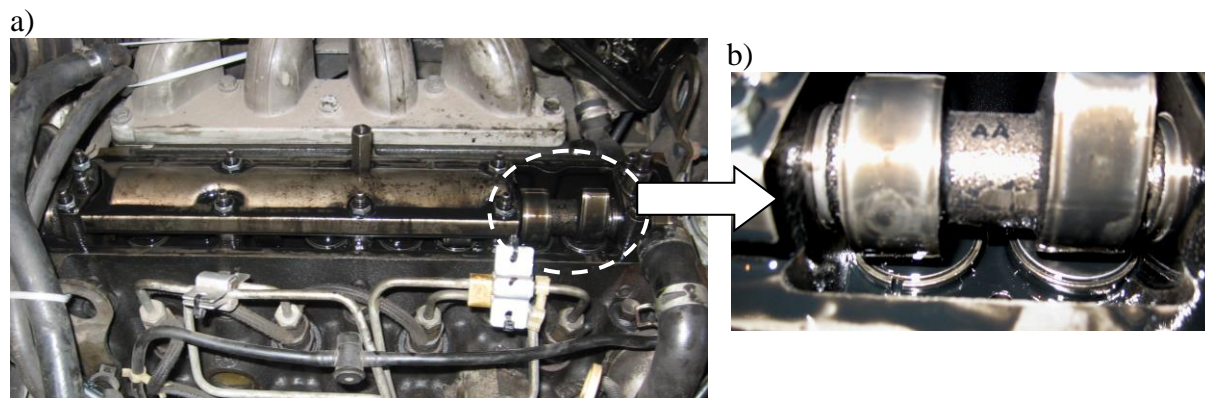
jest w wielu przypadkach niewrażliwy na zmianę stanów elementów silnika, które opisano powyżej.

Często występującą czynnością serwisową w warsztatach samochodowych jest kontrola luzu zaworowego silnika [2-4]. Powiększony luz zaworowy może być powodowany np. zużyciem krzywki wałka rozrządu, ale też uszkodzeniem automatycznych kasowników luzu zaworowego. Czynności serwisowe wymagają w tym przypadku wykonania szeregu zabiegów pomiarowych i regulacyjnych, które nie w każdym przypadku umożliwiają jednoznaczne stwierdzenie uszkodzenia. Autor pracy proponuje zastosowanie do diagnostyki luzu zaworowego metod wibroakustycznych, m.in. prowadzenia pomiarów drgań i hałasu, a następnie ich przetwarzania i analizy.

Jak wynika z dotychczas wykonywanych badań [6-12], możliwe jest diagnozowanie wybranych uszkodzeń silnika spalinowego, a w tym powiększonego luzu zaworowego lub uszkodzonych kasowników luzu zaworowego w silnikach z zapłonem iskrowym [7,11,12]. Trudnym zagadnieniem jest natomiast diagnostyka powiększonego luzu zaworowego w silniku z zapłonem samoczynnym. Proces spalania przebiega w takim silniku pod wyższym ciśnieniem i towarzyszy mu znacząco większy hałas procesu roboczego. W pracy zaprezentowano pierwsze, wybrane wyniki badań tego zagadnienia.

2. METODA BADAŃ

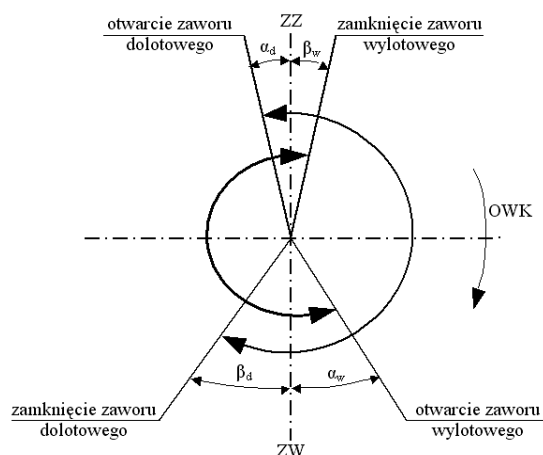
Badania wykonano na silniku samochodu osobowego Ford Fiesta 1,8 dm³ o zapłonie samoczynnym. Silnik wyposażony jest w głowicę 8-zaworową (rys. 1a). W badaniach modelowano powiększony luz zaworowy, który powstać może w wyniku zużycia krzywki wałka rozrządu lub w wyniku uszkodzenia automatycznego kasownika luzu zaworowego. Modelowano luz o wartości 2-krotnie przekraczającej nominalny luz zaworowy przewidziany dla badanego silnika. Badania wykonano na zaworach 4 cylindra, licząc od napędu rozrządu, poprzez zmianę grubości płytek regulacyjnych (rys. 1b).



Rys. 1. Głowica badanego silnika a) oraz widok miejsca, gdzie wykonywano zmiany luzu zaworowego b)

Fig. 1. Cylinder head of test engine a) and view of the place where changes of valve clearance were made

W celu prawidłowej interpretacji sygnału drganiowego silnika na rysunku 2 zamieszczono zmianę kątów faz rozrządu w zależności od zwrotu zewnętrznego (ZZ) i wewnętrznego (ZW) tłoka, a w tabeli 1 wartości tych kątów dla badanego silnika.



Rys. 2. Fazy rozrządu silnika, gdzie: α_d – kąt wyprzedzenia otwarcia zaworu dolotowego, β_d – kąt opóźnienia zamknięcia zaworu dolotowego, α_w – kąt wyprzedzenia otwarcia zaworu wylotowego, β_w – kąt opóźnienia zamknięcia zaworu wylotowego, OWK – kierunek obrotu silnika

Fig. 2. The phases of valve timing, where: α_d – the angle of lead opening of the intake valve, β_d – the angle of lag closing of the intake valve, α_w – the angle of lead opening of the exhaust valve, β_w – the angle of lag closing of the exhaust valve, OWK – the direction of the engine rotation

Tabela 1

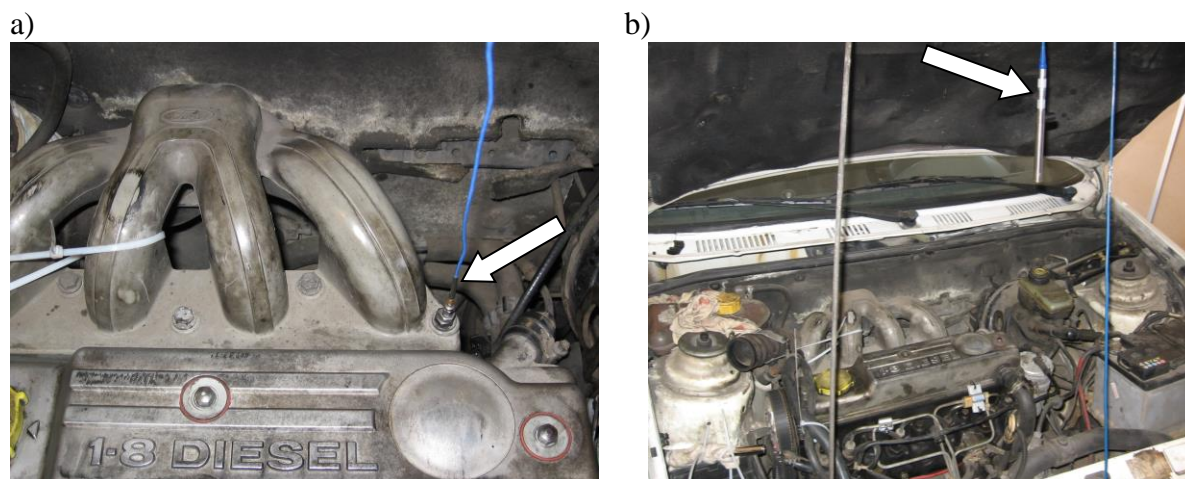
Kąty faz rozrządu

Ford Fiesta 1,8	α_d	6°	α_w	41°
	β_d	57°	β_w	7°

Do diagnostowania uszkodzeń zaworów stosowano układ pomiarowy składający się z:

- przetwornika piezoelektrycznego wyposażonego w magnes, którym mierzono przyspieszenie drgań elementów silnika (rys. 3a),
- analizatora sygnałów Norsonic wraz z mikrofonem pojemnościowym, którym wykonywano pomiary ciśnienia akustycznego ponad pokrywą zaworów silnika (rys. 3b),
- czujnika laserowego, którym określano pozycje wału korbowego,
- analizatora sygnałów DSPT SigLab,
- komputera do rejestracji sygnałów.

Sygnały drganiowe rejestrowano z częstotliwości 25,6 kHz. Do obróbki sygnałów stosowano oprogramowanie Matlab-Simulink [13].



Rys. 3. Przykładowy punkt pomiaru przyspieszenia drgań wybrany w badaniach a) oraz miejsce ustawienia mikrofonu pomiarowego b)

Fig. 3. Exemplary measurement point of vibration acceleration chosen in the investigation a) and the place of measurement microphone b)

3. METODA ANALIZY SYGNAŁÓW

Przyjęto następujący algorytm przetwarzania zarejestrowanych sygnałów:

1. Uśrednianie sygnału zgodnie z sygnałem referencyjnym
2. Filtracja górnoprzepustowa
3. Obliczanie energii przetworzonego sygnału w oknie kroczącym na podstawie zależności:

$$E_{\text{syg.}} = \sum_{i=j}^{j+k} n(i)^2,$$

gdzie:

$j=1, \dots, l$

l – ilość próbek przetwarzanego sygnału,

k – szerokość okna kroczącego.

4. Obliczanie rozkładu czasowo-częstotliwościowego Wignera-Ville'a przetworzonego sygnału na podstawie zależności:

$$\text{WV}(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) w(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau,$$

gdzie:

$x^*(t)$ – sygnał urojony sprzężony z $x(t)$,

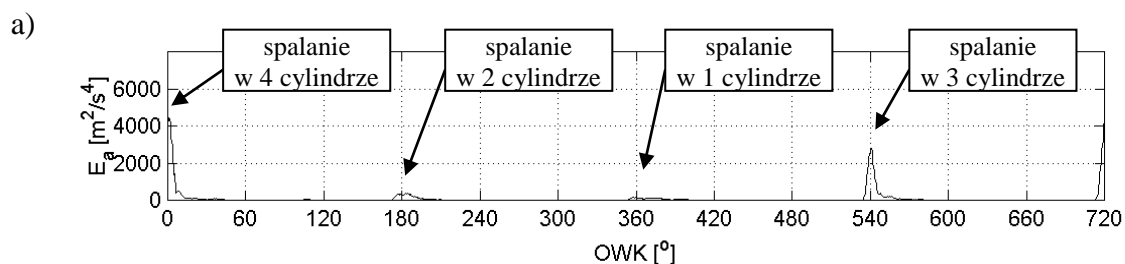
$w(t)$ – funkcja wagi.

4. ANALIZA DRGAŃ SILNIKA

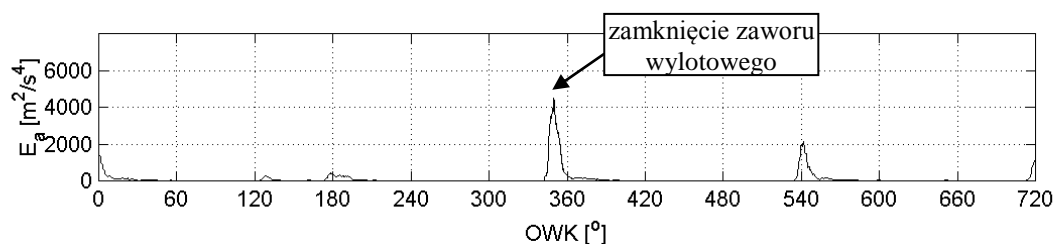
Analizy sygnału drganiowego wykonano stosując filtrację górnoprzepustową w zakresie pasma 180-12800 Hz. Wybór pasma częstotliwości przeprowadzony w badaniach wstępnych, ukierunkowany był na poszukiwanie w całym paśmie drgań tylko zakresów, które zawierają informację o procesie spalania i uszkodzeniu zaworów. Krok ten spowodował odrzucenie informacji będących w tych badaniach zakłóceniem.

Na rysunkach 4 i 5 zamieszczono wyznaczoną energię przyspieszenia drgań silnika oraz rozkłady Wignera-Ville'a sygnału drganiowego w zakresie kątów obrotu wału korbowego odpowiadających miejscom występowania uszkodzenia.

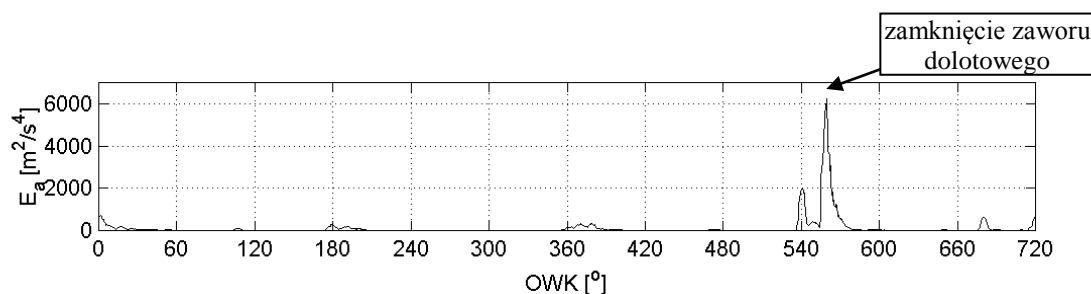
W sygnale drganiowym zarejestrowanym dla silnika, w którym nie było uszkodzenia, występuje lokalny wzrost amplitudy energii towarzyszący procesowi spalania. Wzrost ten jest nierównomierny, co spowodowane jest wyborem miejsca pomiaru w pobliżu cylindra 3 i 4.



b)



c)

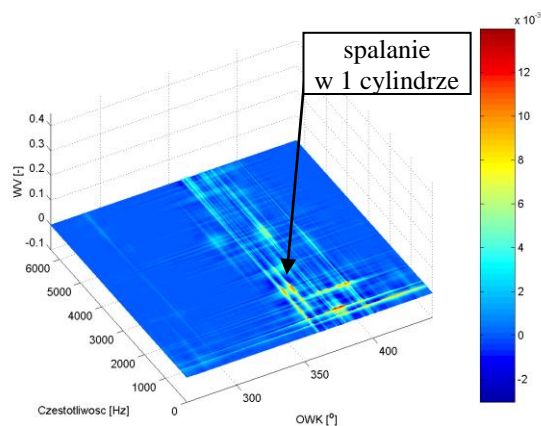


Rys. 4. Sygnały energii drgań silnika zarejestrowane dla: a) silnika w stanie dobrym, b) silnika z modelowanym uszkodzeniem zaworu wylotowego, c) silnika z modelowanym uszkodzeniem zaworu dolotowego
 Fig. 4. Engine vibration energy signals recorded for: a) engine in a good condition, b) engine with a model damage of exhaust valve, c) engine with a model damage of intake valve

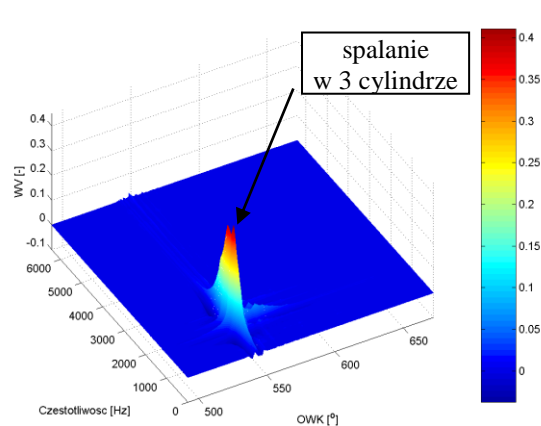
W przypadku występowania zwiększonego luzu zaworowego w sygnale energii drgań obserwuje się lokalny wzrost amplitudy w zakresie zamykania uszkodzonych zaworów.

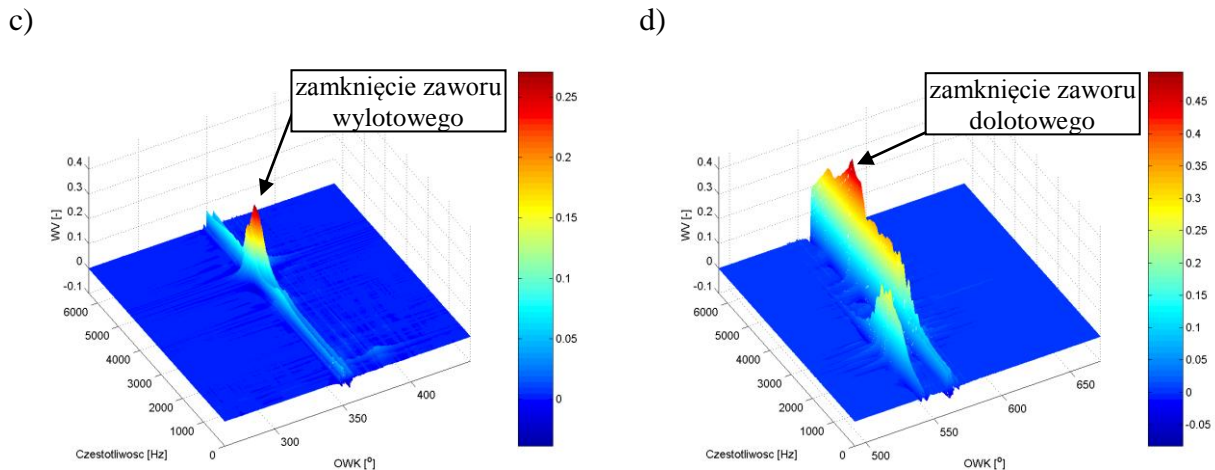
Wykonanie rozkładów czasowo-częstotliwościowych przetworzonych sygnałów drganiowych umożliwiło wyznaczenie pasm częstotliwości, w których występuje proces spalania – zakres 1,5-3,0 kHz. W rozkładzie czasowo-częstotliwościowym sygnału drganiowego, zarejestrowanego w przypadku pracy silnika z powiększonym luzem zaworowym, obserwuje się lokalny wzrost amplitudy w zakresie wyższych częstotliwości – powyżej 2,5 kHz. Zamykaniu uszkodzonych zaworów towarzyszy także szerokopasmowe pobudzenie sygnału drganiowego, jednak amplituda tego pobudzenia ma mniejszą wartość.

a)



b)





Rys. 5. Rozkłady WV sygnału przyspieszeń drgań silnika zarejestrowane dla: a-b) silnika w stanie dobrym, c) silnika z modelowanym uszkodzeniem zaworu wylotowego, d) silnika z modelowanym uszkodzeniem zaworu dolotowego

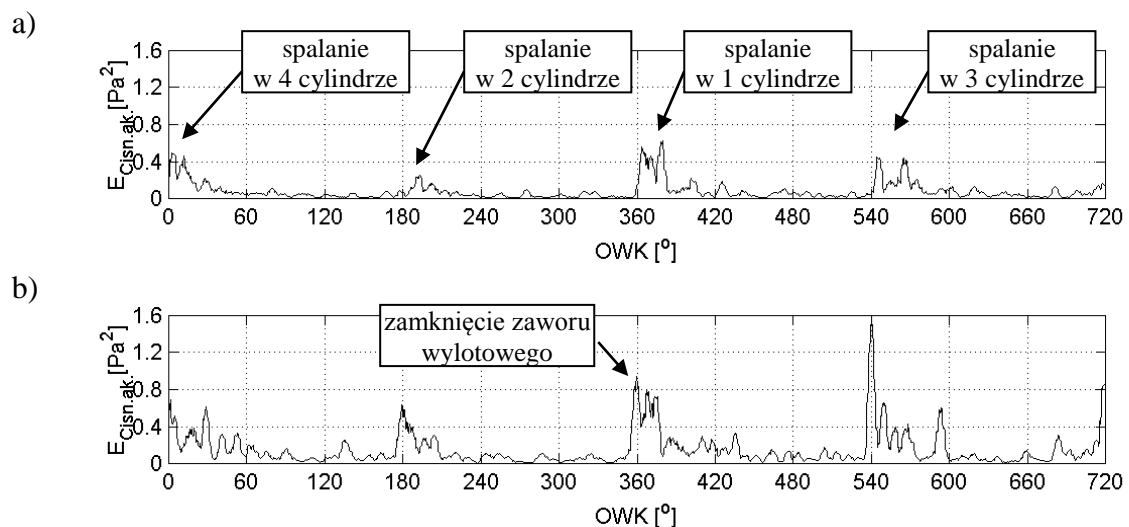
Fig. 5. WV decomposition of engine vibration acceleration signal recorded for: a-b) engine in a good condition, c) engine with a model damage of exhaust valve, d) engine with a model damage of intake valve

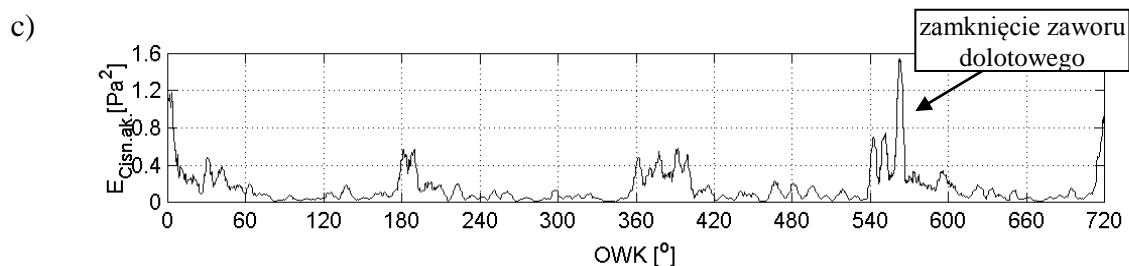
5. ANALIZA HAŁASU SILNIKA

Analizę informacji zawartej w hałasie emitowanym przez silnik wykonano prowadząc obliczenia w pasmach częstotliwości ciśnienia akustycznego, w których występuje wzrost amplitudy spowodowany procesem spalania. W badaniach wstępnych wytypowano taki zakres częstotliwości, który wynosił 580 – 12800 Hz.

Na rysunkach 6 i 7 zamieszczono wyznaczoną energię ciśnienia akustycznego generowanego przez silnik oraz rozkłady Wignera-Ville'a tego ciśnienia w zakresie kątów obrotu wału korbowego, odpowiadających miejscom występowania uszkodzeń.

Przebieg energii drgań w tym paśmie częstotliwości jest mało wrażliwy na powiększony luz wybranych zaworów. Wzrost amplitudy energii spowodowany procesem spalania silnie dominuje nad wzrostem amplitudy energii spowodowanym przez uszkodzenie zaworu.

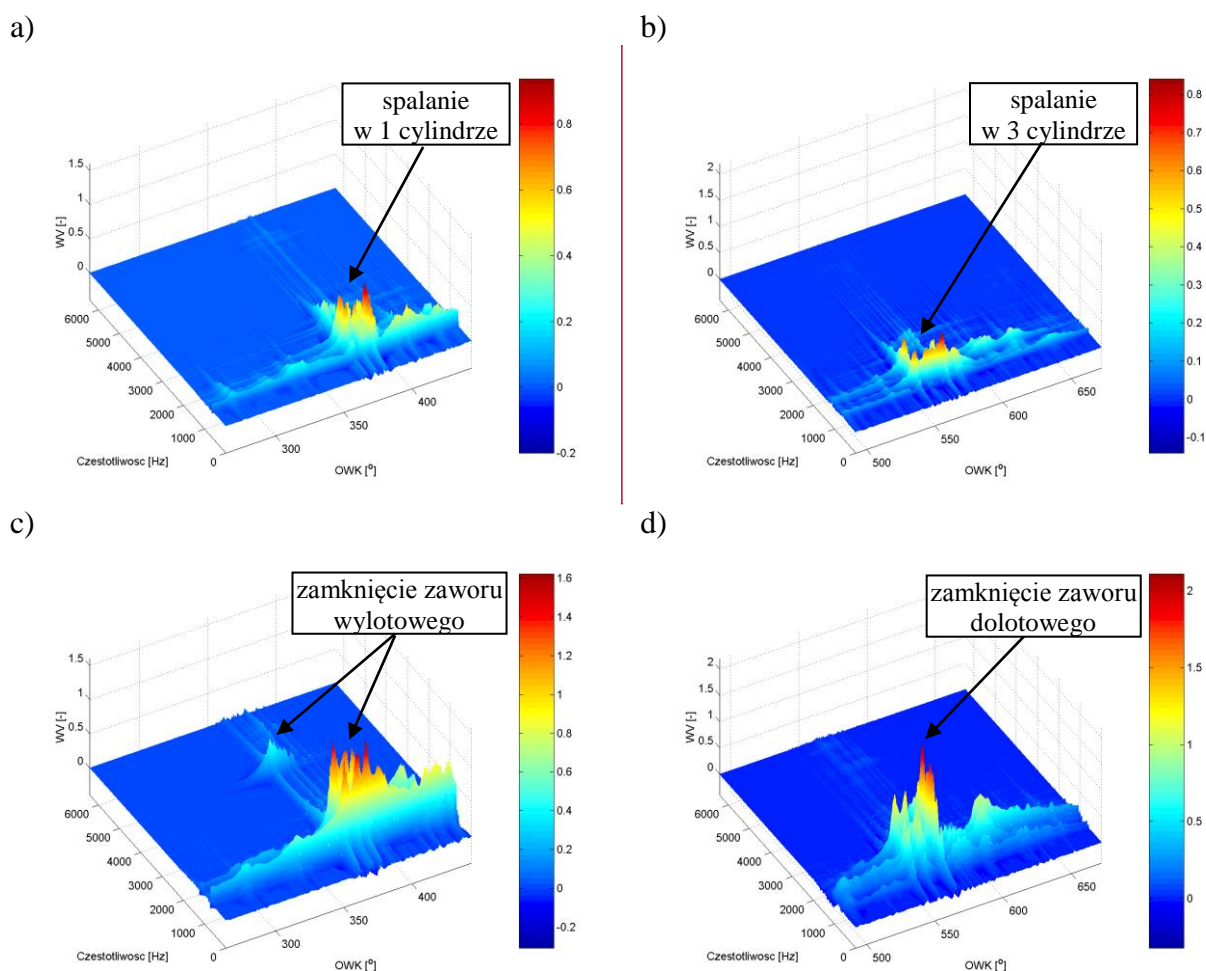




Rys. 6 Sygnały energii hałasu silnika zarejestrowane dla: a) silnika w stanie dobrym, b) silnika z modelowanym uszkodzeniem zaworu wylotowego, c) silnika z modelowanym uszkodzeniem zaworu dolotowego

Fig. 6. Engine noise energy signals recorded for: a) engine in a good condition, b) engine with a model damage of exhaust valve, c) engine with a model damage of intake valve

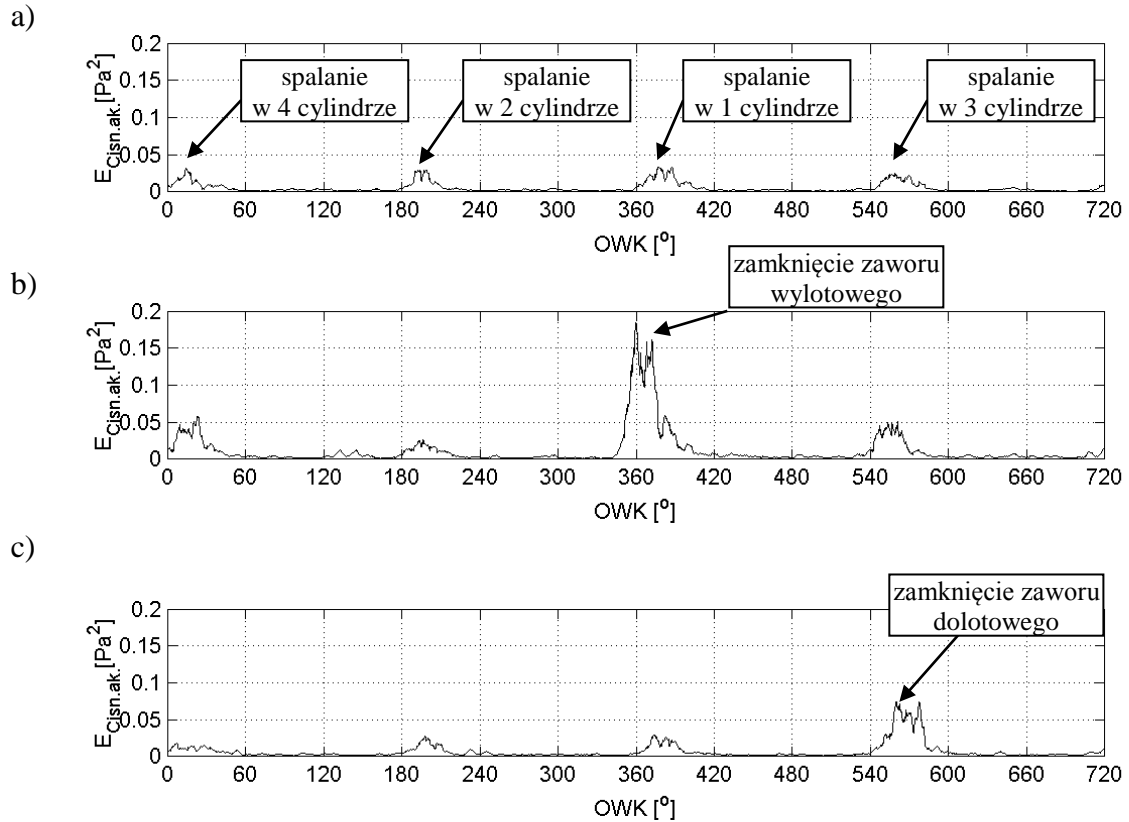
Wykonane rozkłady czasowo-częstotliwościowe ciśnienia akustycznego umożliwiają wytypowanie zaworu o powiększonym luzie, jednak wzrost amplitudy w rozkładzie pokrywa się z pasmem częstotliwości zawierającym informacje o spalaniu.



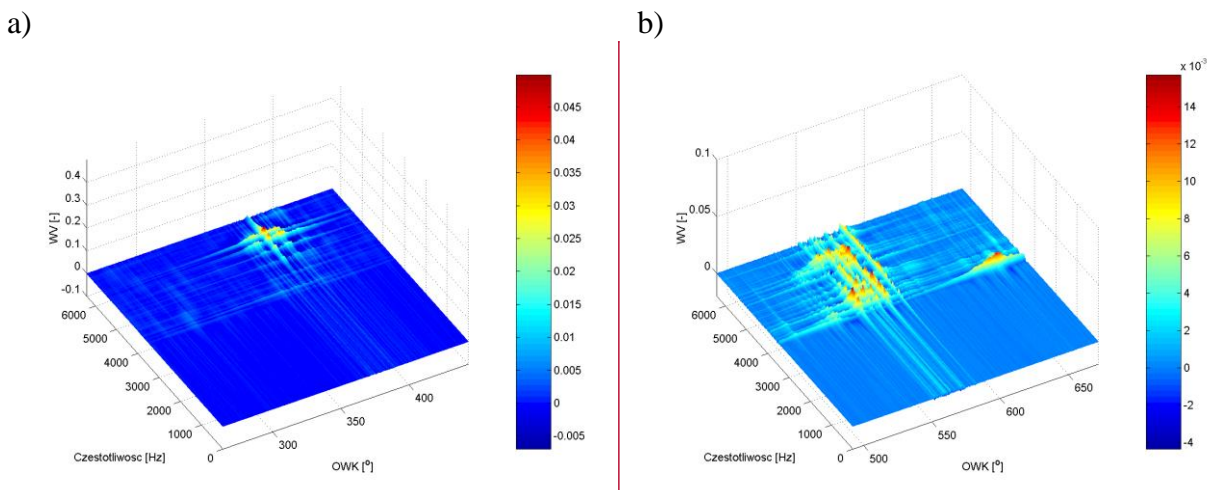
Rys. 7. Rozkłady WV sygnału hałasu silnika zarejestrowane dla: a-b) silnika w stanie dobrym, c) silnika z modelowanym uszkodzeniem zaworu wylotowego, d) silnika z modelowanym uszkodzeniem zaworu dolotowego

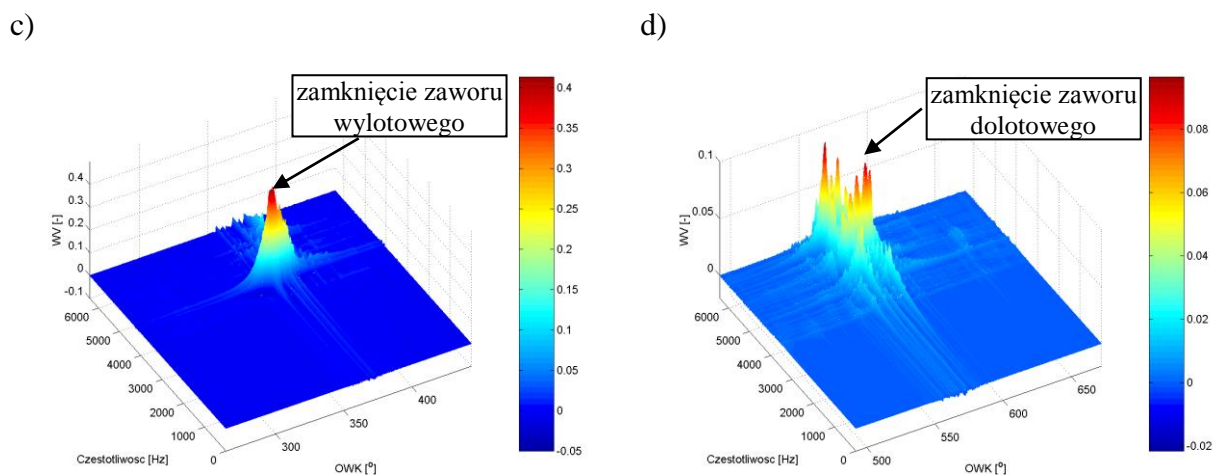
Fig. 7. WV decomposition of engine noise signal recorded for: a-b) engine in a good condition, c) engine with a model damage of exhaust valve, d) engine with a model damage of intake valve

W celu wyboru wrażliwych pasm częstotliwości zawierających informacje o zwiększonym luzie zaworowym, prowadzono dalsze analizy pasmowe ciśnienia akustycznego. Na podstawie wykonanych badań wyznaczono nowe pasmo wysokoczęstotliwościowe ciśnienia akustycznego – zakres 3,4-12,8 kHz, zawierające informację o analizowanym luzie zaworowym. Obliczona w tym przypadku energia sygnału oraz rozkłady czasowo-częstotliwościowe jednoznacznie przedstawiają wzrost amplitudy towarzyszący zamykaniu zaworów o powiększonych luzach (rys.8 i 9).



Rys. 8. Sygnały energii hałasu silnika zarejestrowane dla: a) silnika w stanie dobrym, b) silnika z modelowanym uszkodzeniem zaworu wylotowego, c) silnika z modelowanym uszkodzeniem zaworu dolotowego
 Fig. 8. Engine noise energy signals recorded for: a) engine in a good condition, b) engine with a model damage of exhaust valve, c) engine with a model damage of intake valve





Rys. 9. Rozkłady WV sygnału hałasu silnika zarejestrowane dla: a-b) silnika w stanie dobrym, c) silnika z modelowanym uszkodzeniem zaworu wylotowego, d) silnika z modelowanym uszkodzeniem zaworu dolotowego

Fig. 9. WV decomposition of engine noise signal recorded for: a-b) engine in a good condition, c) engine with a model damage of exhaust valve, d) engine with a model damage of intake valve

6. PODSUMOWANIE

Diagnostowanie silników spalinowych samochodów osobowych wymaga prowadzenia dalszych badań w celu opracowania nowych metod identyfikacji powiększających się luzów oraz występujących uszkodzeń. Dzięki rozwojowi techniki komputerowej do diagnostowania silnika można obecnie stosować badania wykorzystujące pomiary i analizy sygnałów drganiowych oraz hałasu.

Wyniki badań wskazują, że zastosowanie zarówno pomiarów drgań, jak i hałasu umożliwia wskazanie zaworu o powiększonym ponadnormatywnie luzie. Na podstawie wykonanych eksperymentów wyciągnąć można wniosek, iż analiza drgań jest wrażliwszą metodą diagnostyki tego typu uszkodzenia silnika. Pomiar i analiza ciśnienia akustycznego w pobliżu silnika wydaje się metodą perspektywistyczną, gdyż pomiar przeprowadza się w sposób bezkontaktowy, a dodatkowo wymagany jest jedynie sygnał referencyjny o położeniu wału korbowego.

Dalsze badania wymagają diagnostowania innych przypadków luzów zaworowych silnika.

Bibliografia

1. Ubysz A.: Współczesne silniki samochodowe. Cz. 1. Wybrane zagadnienia z konstrukcji i technologii produkcji. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
2. Ubysz A., Figlus T.: Ćwiczenia laboratoryjne z silników spalinowych i ochrony środowiska. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
3. Instrukcja napraw samochodu VW Golf, Bora, Volkswagen AG 2001.
4. Lehmann W.: Reparatur - und Einstelltabeln. Kfz-betrieb. Vogel Wurzburg Ausgabe 1998/99.
5. Bocheński C., Janiszewski T.: Diagnostyka silników wysokoprężnych. WKŁ Warszawa 1996.

6. Flekiewicz M., Madej H.: Recovery of impact signatures in diesel engine using wavelet packet transform (WPT), *Diagnostyka* 2007 nr 4, s. 25-30.
7. Figlus T.: Diagnostowanie luzów zaworowych silników spalinowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z. 61, Gliwice 2007, s. 129-136.*
8. Dąbrowski Z., Madej H.: O użyteczności symptomów wibroakustycznych w nowoczesnej diagnostyce silników spalinowych, *Przegląd Mechaniczny* 1/2007.
9. Madej H.: Diagnostowanie uszkodzeń mechanicznych silników spalinowych metodami wibroakustycznymi, *Przegląd Mechaniczny*, 2008 r. 67 nr 1, s. 19-23.
10. Madej H., Czech P.: Attempt to utilise histogram of vibration cepstrum of engine body for setting up the clearance model of the piston-cylinder assembly for PNN neural classifier, *J. Kones, Powertrain Transp.* 2008, vol. 15, no. 3, s. 305-311.
11. Figlus T., Madej H., Wilk A.: Diagnostowanie uszkodzeń hydraulicznych kasowników luzu zaworowego silnika spalinowego, *XXXV Jubileuszowe Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka 03-08.03.2008r.*
12. Figlus T.: Ocena stanu kasowników luzu zaworowego silników spalinowych metodą analizy drgań, *VII International Technical Systems Degradation Seminar, Liptowski Mikulasz 2008.*
13. *Signal Processing Toolbox for Use with Matlab, User's Guide Version 4.2. The MathWorks, 1988-1999.*

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Dąbrowski

Praca wykonana w ramach BW-511/RT2/2008