

Diagnozowanie uszkodzenia zaworu wylotowego silnika spalinowego na podstawie analizy falkowej drgań

Streszczenie W referacie zaproponowano metodę diagnozowania nieszczelności zawór wylotowy – cylinder w oparciu o pomiar sygnału drgań głowicy silnika. Przedstawiono wyniki analizy pomiarów sygnału drgań silnika w warunkach uszkodzonego zaworu wylotowego silnika oraz niewłaściwego luzu zaworowego. W tym celu przeprowadzono czynny eksperyment diagnostyczny na silniku samochodu Fiat Punto 1.2. W czasie testów drogowych zarejestrowano sygnał przyspieszenia drgań, a także pomocnicze sygnały służące synchronizacji oraz identyfikacji faz rozrządu. Wykorzystano przy tym naturalne wzmocnienie drgań w zakresie częstotliwości rezonansowej czujnika piezoelektrycznego. Zadawalające rezultaty uzyskano w oparciu o analizę falkową sygnału przyspieszenia drgań silnika. Wyznaczono miary sygnału w jednoznaczny sposób określający stan zaworu. Metoda jest nieinwazyjna, a badania przeprowadzane są w warunkach eksploatacyjnych. Z pewnymi modyfikacjami metoda może być zastosowana do diagnozowania zaworów on-line.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, drgania silnika, zawór wylotowy, analiza falkowa

Diagnosing damaged exhaust valve of engine based on wavelet analysis of vibration

Abstract: The paper proposes the method of diagnosing of cylinder exhaust valve leakage based on the measurement of the cylinder head vibration signal. The results of vibration signal analysis of the engine with the damaged exhaust valve and with changed exhaust valve clearance are presented. In this purpose the diagnostic experiment was carried out with car engine Fiat Punto 1.4. During road test the acceleration vibration signal was recorded with additional signals for synchronization and engine timing. The natural amplification of vibration at the range of resonance frequency of the piezoelectric sensor was used. Satisfactory results were obtained based on wavelet analysis of engine vibration signal. The measures of signal were determined that allow determination of the valve condition. This is the non-invasive method and the investigations are conducted during car maintenance. With some modification the method can be used for on-line diagnosis of the exhaust valves.

Key words: reciprocating engine, engine vibration, exhaust valve, wavelet analysis

1. Wstęp

Podczas pracy silnika zawory wylotowe nagrzewając się ulegają wydłużeniu. Na skutek tego może dochodzić do niecałkowitego ich zamknięcia. Drugim powodem utraty szczelności, a co za tym idzie spadku mocy silnika, jest szybsze zużywanie się gniazda zaworu niż krzywki na wałku rozrządu. Z kolei utrata szczelności grozi nadtapianiem gniazd zaworowych oraz grzybka zaworu, ponieważ gorące spaliny przepływają wokół niedomkniętego zaworu powodują nadmierne grzanie się tych elementów.

Aby zapewnić szczelność zaworów przewidziany jest konstrukcyjnie luz zaworowy, w postaci minimalnego odstępu między określonymi elementami w mechanizmie rozrządu. Ten odstęp w zależności od konstrukcji silnika, typu rozrządu, zastosowanych materiałów, zmniejsza się lub zwiększa w miarę wzrostu temperatury pracy silnika. Zbyt mały luz zaworowy (lub jego brak) może powodować nie domykanie się zaworów, natomiast luz nadmierny powoduje spadek mocy, zwiększa hałas

pracy silnika, i przyczynia się do nadmiernego zużycia układu rozrządu.

Sygnał drganiowy silnika jest wrażliwy na uszkodzenie zaworu wylotowego, co przedstawiono w pracach [3-7]. Nieszczelność zaworu objawia się wzrostem amplitud drgań głowicy silnika w zakresie wysokich częstotliwości, powodując zjawiska wtórne w postaci rezonansów elementów silnika. W niniejszym artykule opisano wyniki eksperymentu czynnego badającego wpływ zmiany luzu zaworowego oraz uszkodzenia zaworu wylotowego na charakterystyki drganiowe głowicy silnika.

2. Opis eksperymentu i charakterystyk drganiowych

Badania przeprowadzono na 4-cylindrowym silniku ZI 1.4 samochodu Fiat Punto podczas jazdy z ustaloną prędkością w następujących warunkach symulowanych uszkodzeń:

- 1) optymalnego luzu zaworowego wynoszącego 0,8 mm
- 2) zwiększonego luzu zaworowego o 0,06 mm
- 3) zmniejszonego luzu zaworowego o 0,06 mm

- 4) uszkodzenia zaworu I spowodowanego wycięciem ok. 3 mm
- 5) uszkodzenia zaworu II spowodowanego wycięciem ok. 6 mm (rys.1).



Rys.1. Uszkodzony zawór wylotowy (typ II)

Podczas eksperymentu rejestrowano następujące sygnały:

- przyspieszenia drgań głowicy silnika przy 1. cylindrze w kierunku pionowym i poziomym
- przyspieszenia drgań głowicy silnika przy 4. cylindrze w kierunku pionowym
- hałasu w komorze silnika
- z czujnika położenia wału korbowego
- zapłonu w 1. cylindrze
- położenia przepustnicy.

Przyspieszenia drgań głowicy silnika był pomierzony przy pomocy czujników Bruel & Kjaer DeltaShear typ 4393 o zakresie częstotliwości 0,1-16500 Hz, częstotliwości rezonansowej 55 kHz i temperaturze pracy $-74\pm 250^{\circ}\text{C}$, zamocowanego przy pomocy połączenia gwintowego. Sygnały rejestrowano przy pomocy przenośnego urządzenia do rejestracji danych Bruel & Kjaer PULSE typ 3560E. Sygnały dodatkowe umożliwiły identyfikację cykli pracy silnika, momentów wtrysku, zapłonu oraz faz rozrządu.

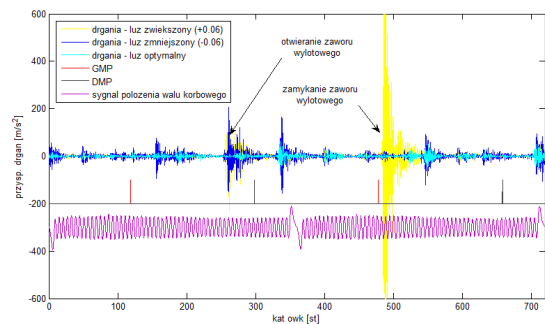
Rozszczelnienie zaworów wywołuje efekt „gwizdania”, który można wzmocnić poprzez wykorzystanie zakresu częstotliwości rezonansowej (55 kHz) piezoelektrycznego czujnika przyspieszenia drgań. Karta przetworników analogowo-cyfrowych umożliwia rejestrację sygnału z częstotliwością 65536 Hz, co pozwoliło wejść w strefę drgań rezonansowych i wzmocnić naturalnie odpowiedź drganiową nieszczelnego cylindra [5]. Na rys. 2a przedstawiono przebiegi drgań głowicy silnika uśrednione synchronicznie za 10 cykli pracy w funkcji kąta obrotu wału korbowego dla różnych wartości luzu zaworowego, natomiast na rys. 2b nałożono na siebie przebiegi dla różnego stopnia uszkodzenia zaworu wylotowego.

Jak można zauważyć, nastąpił wzrost amplitud odpowiedzi drganiowej na wymuszenia impulsowe, a zwłaszcza otwieranie i zamykanie nieszczelnego zaworu. Zastosowanie uśredniania synchronicznego potwierdza powtarzalność procesu powstawania odpowiedzi drganiowej oraz eliminuje możliwość wystąpienia przypadkowego błędu diagnozy. Operacja uśredniania powoduje dodatkowo, że wzmocnione są odpowiedzi rezonansowe, natomiast inne drgania są mniej widoczne. Dlatego przy optymalnym luzie i sprawnym zaworze uśredniony syn-

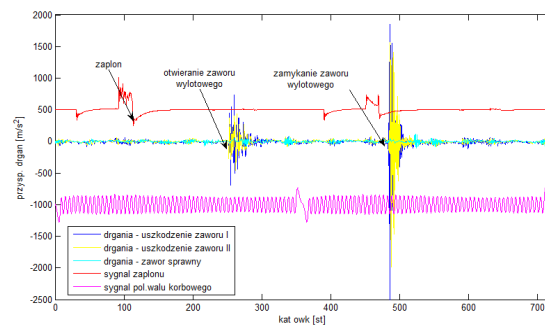
chronicznie przebieg drgań jest nieznaczny w porównaniu z odpowiedzią rezonansową czujnika.

Zarejestrowane sygnały drgań są niestacjonarne, do dalszej analizy wykorzystano więc narzędzie w postaci falek.

a)



b)



Rys.2. Uśrednione synchronicznie przebiegi drgań głowicy silnika w kierunku poziomym dla prędkości 3000 obr/min a) dla trzech wartości luzu zaworowego: optymalnego (turkusowy), zmniejszonego (granatowy) i zwiększonego (żółty) b) dla trzech stanów uszkodzenia: zaworu sprawnego (turkusowy), z uszkodzeniem I (granatowy) i uszkodzeniem II (żółty)

3. Wyniki analizy falkowej

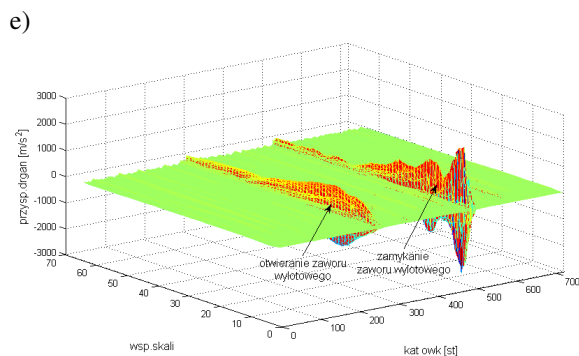
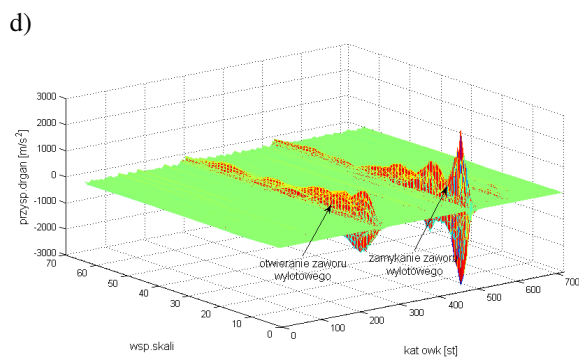
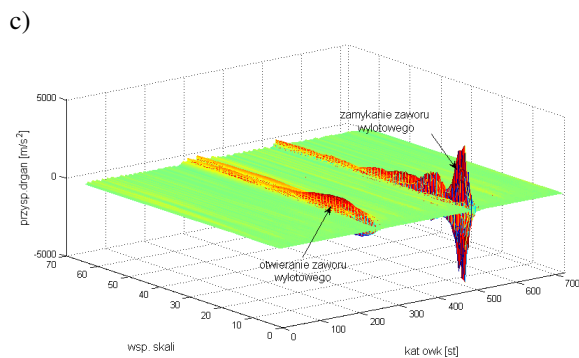
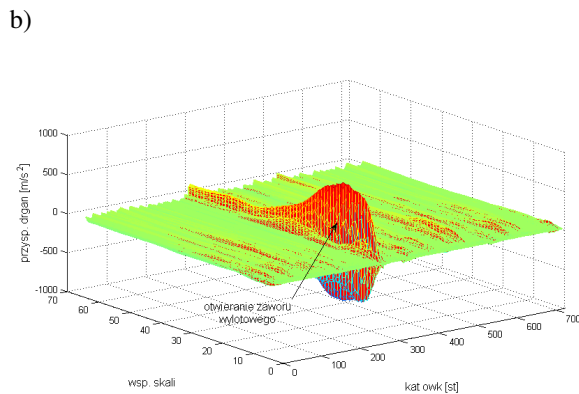
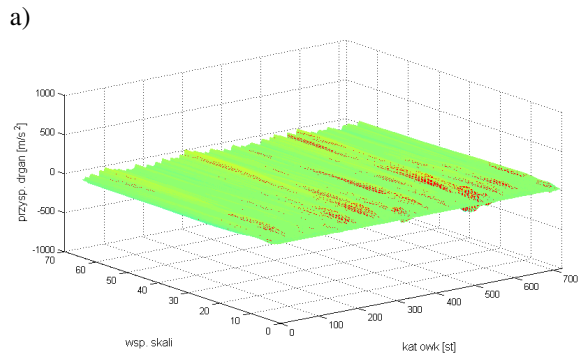
Ciągła transformata falkowa CTF funkcji $f(t)$ jest określona następującym równaniem [1]:

$$Wf(b, a) = (f, \psi_{ab}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{ab}(t)^* dt \quad (1)$$

gdzie:

$Wf(b, a)$ - współczynniki falkowe jako funkcja dwóch parametrów: skali a oraz przesunięcia b ,
 $\psi_{ab}(t)$ - rodzina falek wygenerowanych przy użyciu falki podstawowej $\psi(t)$

Zmiana skali oznacza kompresję (przy zmniejszeniu skali) lub rozciągnięcie (przy zmniejszeniu skali) falki ψ_{ab} . Ponieważ współczynniki $Wf(b, a)$ stanowią miarę korelacji sygnału f z falką ψ_{ab} , dla falki wąskiej (mała skala) reprezentują zawartość składowych wysokoczęstotliwościowych w analizowanym sygnale, a dla falki szerokiej (duża skala) reprezentują zawartość składowych niskoczęstotliwościowych.



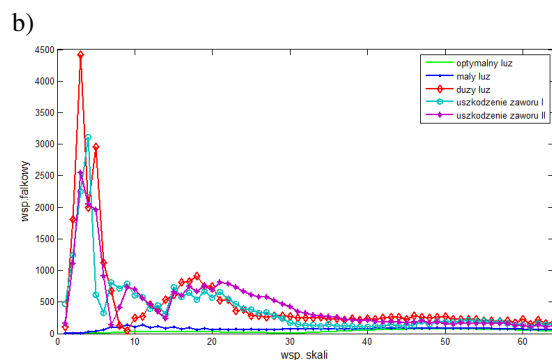
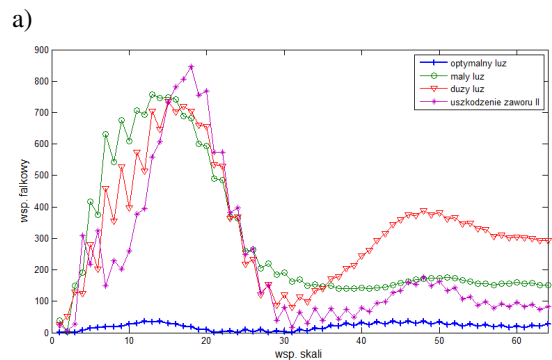
Rys.3. Analiza falkowa uśrednionego synchronicznie sygnału drgań głowicy silnika w kierunku poziomym przy prędkości 3000 obr/min dla

- a) optymalnego luzu zaworowego 0,8 mm
- b) zmniejszonego luzu zaworowego do 0,74 mm.
- c) zwiększonego luzu zaworowego do 0,86 mm
- d) uszkodzonego zaworu – uszkodzenie I
- e) uszkodzonego zaworu – uszkodzenie II

Na rys.3 przedstawiono wyniki analizy falkowej CTF przy użyciu falki Daubechies 4 (Db4) [2] dla badanych uszkodzeń i luzów zaworu wylotowego wykorzystując program Matlab.

Wykonana analiza pokazuje, że w warunkach utraty szczelności zaworu podczas jego zamykania występuje zwiększona amplituda drgań dla wszystkich współczynników skali (wszystkich częstotliwości) ze szczególnym wzmocnieniem w zakresie częstotliwości rezonansowej czujnika drgań (mały współczynnik skali). Natomiast dla zmniejszonego luzu zaworowego taka odpowiedź jest szczególnie widoczna podczas otwierania zaworu. Występowanie rezonansu powoduje, że niemożliwe staje się rozróżnienie stopnia zużycia lub uszkodzenia zaworu.

Na rys.4. przedstawiono przekroje wykresu analizy falkowej w momencie otwierania (rys.4a) i zamykania zaworu (rys.4b) w funkcji współczynnika skali, a właściwie ich wartości bezwzględne.



Rys.4. Przekroje wykresów CTF (wartość bezwzględna) w funkcji współczynnika skali w chwili
a) otwierania zaworu wylotowego
b) zamykania zaworu wylotowego

Na podstawie charakterystyk przekrojowych pokazanych na rys.4 wyznaczono miary średnie w chwili otwierania i zamykania zaworu:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{a_1}^{a_2} x_i(a) \quad (2)$$

gdzie:

a – współczynnik skali

$x_i(a)$ - wartość bezwzględna amplitudy falki Db4 dla skali a

a_1, a_2 – granice współczynnika skali.

Zakres współczynnika skali (a_1, a_2) przyjęty do obliczenia miary jest zależny od badanego silnika. Dla opisanego silnika Fiata maksimum amplitud przy otwieraniu zaworu przypada na współczynniki skali od 10 do 20, natomiast dla zamykania zaworu od 3 do 6. Uniwersalną metodą jest obliczanie miary w całym zakresie współczynnika skali tj. od 1 do 64. W tabeli 1 zestawiono obliczone miary dla dwóch zakresów: całego (1-64) oraz wytypowanego dla badanego silnika, a na rys.5 przedstawiono je w postaci wykresu słupkowego.

Tab.1. Zestawienie miar wartości średnich wyznaczonych na podstawie zależności (2)

stan zaworu	otwieranie zaworu		zamykanie zaworu	
	granicznie wsp. skali $a_1=1$ $a_2=64$	$a_1=3$ $a_2=30$	$a_1=1$ $a_2=64$	$a_1=1$ $a_2=7$
zawór sprawny, optymalny luz	19,2	14,9	37,2	4,2
mały luz	295,7	484,8	74,2	35,1
duży luz	334,9	422,3	484,7	1870,7
uszkodzenie I zaworu	217,3	348,9	395,1	1260,5
uszkodzenie II zaworu	225,8	399,3	455,2	1270,7

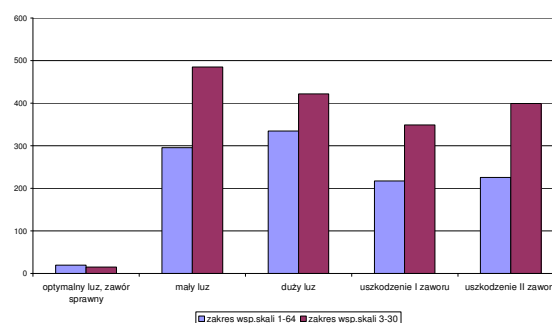
Analiza tab.1 i rys.5 pozwala sformułować następujące wnioski:

- 1) wyznaczone miary pozwalają na jednoznaczne diagnozowanie stanu nieprawidłowego zaworu tj. uszkodzenia lub niewłaściwego luzu zaworowego
- 2) wykorzystanie zjawiska rezonansu czujnika nie pozwala na rozróżnienie stanów zwiększonego luzu zaworowego, mniejszego czy też większego uszkodzenia zaworu
- 3) stan zmniejszonego luzu zaworowego wyróżnia się zwiększoną miarą podczas otwierania zaworu, nie ma natomiast wpływu na zamykanie
- 4) bardziej charakterystyczne są miary wyznaczone w wytypowanych granicach współczynnika skali niż miary wyznaczone dla całego zakresu współczynnika skali.

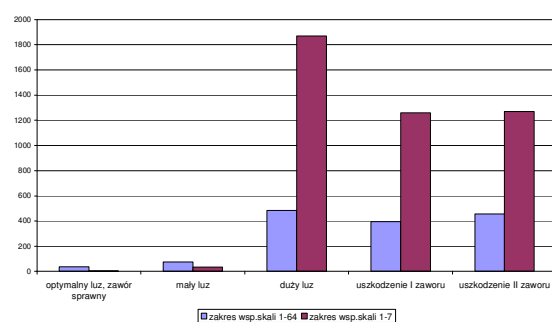
Nomenclature/Skróty i oznaczenia

CTF ciągła transformata falkowa/CVT continuous wavelet transform

a)



b)



Rys.5. Zestawienie miar charakterystycznych wyznaczonych na podstawie analizy falkowej według zależności (2) dla:
a) otwierania zaworu wylotowego
b) zamykania zaworu wylotowego

4. Podsumowanie

Tak jak dla sygnałów synchronicznych i okresowych użytecznym narzędziem analizy jest transformata Fouriera, tak dla sygnałów niestacjonarnych (jakim są wysokoczęstotliwościowe odpowiedzi drganiowe na pracę zaworów) jest to transformata falkowa. Przedstawiono metodę wykrywania uszkodzenia zaworu wylotowego i niewłaściwego luzu zaworowego w oparciu o miary wyznaczone na podstawie analizy falkowej odpowiedzi drganiowych w chwili otwierania i zamykania zaworu. Wybrano falkę Daubechies 4 w oparciu o kryterium maksymalnej amplitudy odpowiedzi rezonansowej.

Wyznaczone miary pozwalają w sposób jednoznaczny na diagnozowanie uszkodzenia zaworu wylotowego lub niewłaściwego luzu zaworowego. W artykule przedstawiono wyniki analizy ciągłej, ponieważ jest łatwiejsza w interpretacji, choć zajmuje dużo pamięci. Analiza dyskretna, ze względu na oszczędniejsze kodowanie sygnału jest używana do praktycznej realizacji algorytmu diagnozy.

Z pewnymi modyfikacjami opisana metoda diagnozowania zaworów wylotowych może być realizowana on-board.

Bibliography/Literatura

- [1] Białasiewicz J.T.: Falki i aproksymacje. WNT, Warszawa 2000.
- [2] Daubechies I., Ten Lectures on Wavelets, CBMS-NSF Lecture Notes nr. 61, SIAM, 1994.
- [3] Deuszkiewicz P., Górnicka D.: Częstość Ricce'a jako miara uszkodzenia zaworu silnika spalinowego. Przegląd Mechaniczny Nr 4/2009.
- [4] Górnicka D.: Diagnostowanie uszkodzeń w silniku spalinowym techniką WA (niewykrywalnych przez system OBD). Praca dyplomatyczna, Warszawa 2008.
- [5] Komorska I.: Utilising The Resonance Frequency Of The Engine Vibration Sensor In Diagnostics Of The Exhaust Valve Leakage. Journal of KONES Powertrain and Transport 2010, Vol.17 No.2, pp.209-216.
- [6] Łazarz B., Madej H., Pieruń G., Stanik Z.: Diagnostowanie uszkodzeń zaworów silnika spalinowego na podstawie analizy drgań, IV Międzynarodowy Kongres Diagnostyki Technicznej, Olsztyn 2008.
- [7] Madej H., Łazarz B., Pieruń G.: Application of the wavelet transform in SI engine valve faults diagnostics, Diagnostyka Nr 4(48)/2008 s.97-102.

Mrs Iwona Komorska DEng. - doctor at the Faculty of Mechanics at Radom University of Technology.

dr inż. Iwona Komorska – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Radomskiej.



Mr Zbigniew Stanik DEng. - doctor at the Faculty of Transport at Silesian University of Technology.

dr inż. Zbigniew Stanik – adiunkt na Wydziale Transportu Politechniki Śląskiej.

