

Analiza sygnału drgań silnika o zapłonie iskrowym w warunkach drogowych

IWONA KOMORSKA

Politechnika Radomska

Sygnal wibroakustyczny silnika spalinowego jest obecnie wykorzystywany do oceny spalania w silnikach o zapłonie iskrowym. Tymczasem jest on bogatym źródłem wiedzy nie tylko o procesie spalania, lecz również świadczy o różnych uszkodzeniach mechanicznych mających miejsce w zespole napędowym, dotyczących zaworów, sprzęgła, skrzyni biegów. W artykule opisano badania wykonane na silniku spalinowym o zapłonie iskrowym, obejmujące pomiar drgań bloku silnika oraz pomiary dodatkowych sygnałów z czujników, umożliwiające ustalenie parametrów pracy silnika i faz rozrządu. Badania wykonano podczas testów drogowych, a ich celem było oszacowanie wpływu prędkości obrotowej, obciążenia i warunków nawierzchni drogowej na drgania bloku silnika. Sygnal poddano przetworzeniu metodą filtracji, analizy widmowej oraz krótkookresowej transformaty Fouriera. Wykonane pomiary są podstawą opracowania wibroakustycznego modelu diagnostycznego służącego do oceny stanu elementów mechanicznych silnika, tj. zaworów, tłoków itp.

1. Wprowadzenie

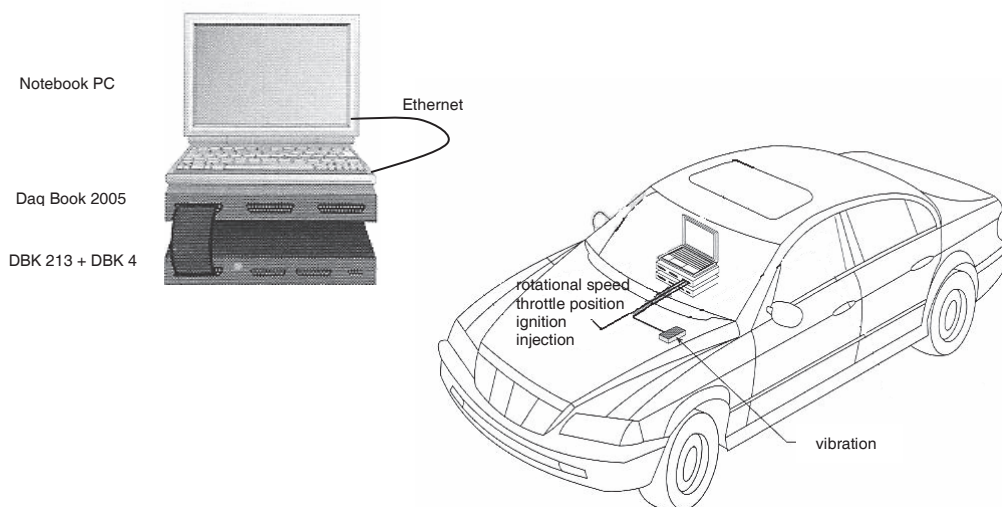
Proces generowania drgań i hałasu w silniku spalinowym jest bardzo złożony. Mierzone drgania są złożeniem fal okresowych związanych z pracą elementów wirujących i odpowiedzi na wymuszenia impulsowe związane z ruchem posuwisto-zwrotnym, a także wymuszeń powodowanych przez ciśnienie gazów. Silne stany przejściowe w sygnale wibroakustycznym pochodzą od pracy zaworów dolotowych i wylotowych, wtryskiwaczy, procesu spalania, uderzeń tłoka o tuleję cylindra. Dla celów diagnostycznych konieczna jest separacja z sygnału odpowiedzi pochodzących od różnych wymuszeń i ich indywidualna analiza. W celu identyfikacji źródeł wymuszeń konieczne jest przejście z dziedziny czasu do dziedziny kąta obrotu wału korbowego. Wówczas większość składowych sygnału wibroakustycznego można rozpatrywać jako cyklostacjonarne. Szczególną trudność stanowi analiza tego sygnału on-line ze względu na zmienność parametrów pracy w warunkach drogowych. Należy uwzględnić zmienne obciążenie, prędkość oraz dodatkowe wymuszenia pochodzące od drogi. Niektóre wymuszenia występują okresowo, np. uderzenia tłoka o tuleję cylindra, otwieranie i zamykanie zaworów (dla silników ze stałymi fazami rozrządu), inne natomiast cechuje zmienność kąta występowania (wtrysk, zapłon). Dlatego

podczas pomiaru drgań konieczna jest również rejestracja dodatkowych sygnałów informacyjnych i synchronizujących.

Uzyskana baza danych ma służyć utworzeniu wibroakustycznego modelu diagnostycznego, na podstawie którego możliwa byłaby identyfikacja uszkodzeń elementów mechanicznych silnika, takich jak zawory (wypalenie, zmiana luzów), tłoki itp. Próby modelowania tego złożonego sygnału pod kątem diagnostyki elementów przedstawiono w pracach [1, 2]. Wymienione uszkodzenia mechaniczne nie są wykrywane przez system OBD, natomiast sygnał wibroakustyczny wydaje się być na nie wrażliwy [3, 4].

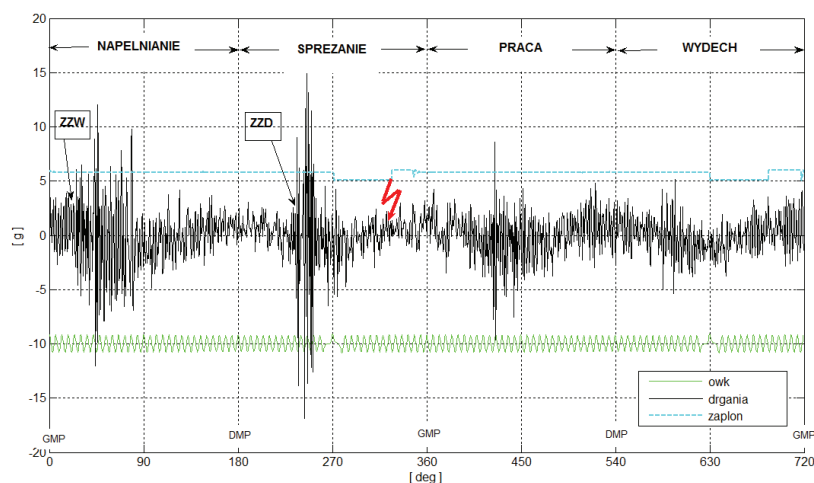
2. Opis badań i metod przetwarzania sygnału

Badania przeprowadzono podczas prób drogowych na silniku 4-cylindrowym o zapłonie iskrowym Renault 1400 K7J, wyposażonym w system ECU Siemens EMS3132. Przeprowadzono serię pomiarów drgań silnika dla różnych prędkości obrotowych, obciążeń oraz nierówności nawierzchni. Główny tor pomiarowy obejmował czujnik drgań B&K DeltaTron typ 4519-002, o zakresie częstotliwości 1 Hz – 20 kHz i temperaturach pracy od -51 do +121°C, zamocowany przy pomocy kleju do bloku silnika przy 1. cylindrze, oraz kartę akwizycji sygnałów dynamicznych DBK04 wyposażoną w zestaw filtrów antyaliasingowych, współpracującą z głównym modulem akwizycji DaqBook 2005 firmy IOtech, który przesyła dane za pomocą złącza Ethernet do notebooka. Poza sygnałem drgań silnika rejestrowano również sygnał położenia wału korbowego silnika, sygnał położenia przepustnicy, sygnały sterujące wtryskiwaczami i cewkami zapłonowymi. Schemat systemu pomiarowego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. System pomiarowy.
Fig. 1. Measurement system.

Sygnały dodatkowe umożliwiły identyfikację cykli pracy silnika, momentów wtrysku, zapłonu oraz faz rozrządu. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy sygnał przyspieszenia drgań silnika dla pojedynczego cyklu pracy wraz z zaznaczonymi fazami rozrządu.

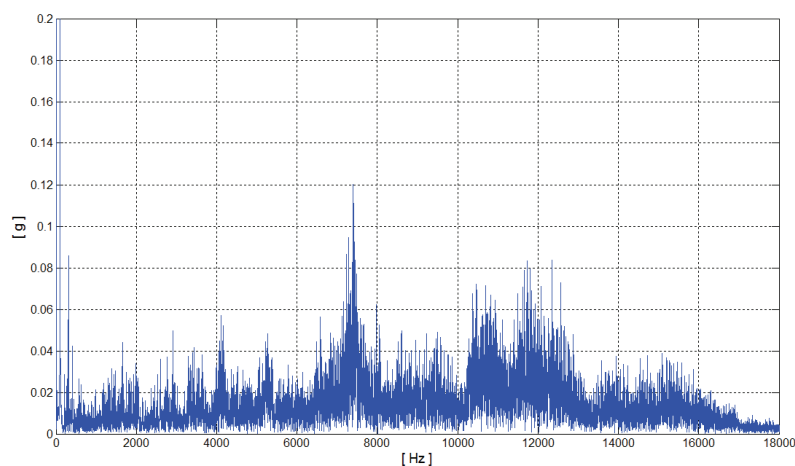


Rys. 2. Sygnał przyspieszenia drgań w czasie trwania cyklu pracy silnika z zaznaczonymi fazami rozrządu dla 1. cylindra (ZZW – zamknięcie zaworu wylotowego, ZZD – zamknięcie zaworu dolotowego, owk – sygnał obrotu wału korbowego silnika, zapłon – sygnał sterowania cewkami zapłonowymi 1. i 4. cylindra).

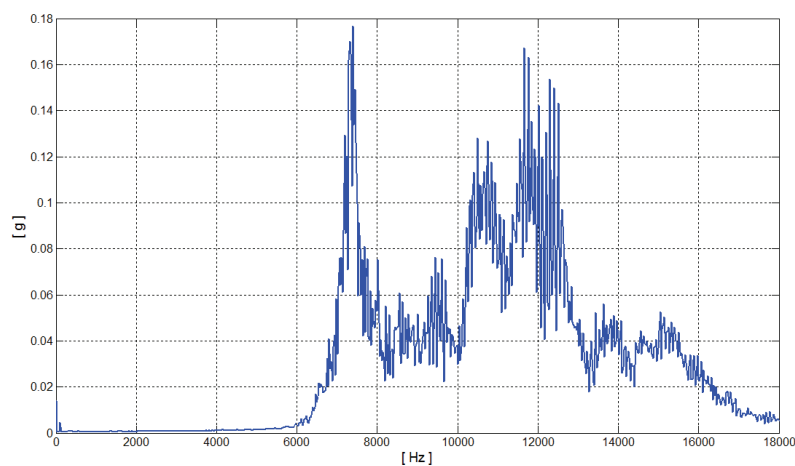
Fig. 2. Signal of vibration acceleration during one cycle of engine operation with timing for 1. cylinder (ZZW – outlet valve closing, ZZD – inlet valve closing, owk – signal of crankshaft revolution, zapłon – signal of ignition coil control for 1. and 4. cylinder).

Podczas cyklu pracy w zarejestrowanym sygnale drganiowym dominują procesy przejściowe będące odpowiedzią na zamykanie zaworów. Ze względu na zamocowanie czujnika drgań przy 1. cylindrze, drgania związane z jego pracą charakteryzują się największą amplitudą. Zarejestrowany sygnał poddano analizie widmowej. Na rysunku 3a przedstawiono widmo amplitudowe wyznaczone dla pojedynczego cyklu pracy, natomiast na rysunku 3b - uśrednione widmo dla 10 cykli pracy silnika w warunkach ustalonych. W widmie dominuje wyraźnie składowa około 7500 Hz oraz składowe wyższe z zakresu 10-13 kHz. Jednak na podstawie tych wykresów trudno jest określić, w którym momencie cyklu jakie składowe występują.

a)



b)



Rys. 3. Analiza widmowa drgań silnika: a) widmo amplitudowe dla pojedynczego cyklu pracy,
b) widmo uśrednione dla 10 cykli pracy.

Fig. 3. Spectrum analysis of the engine vibration: a) spectrum magnitude for the single operation cycle, b) average spectrum magnitude for 10 operation cycles.

Dlatego w następnym kroku sygnał poddano analizie metodą krótkookresowej transformaty Fouriera STFT (short-time Fourier transform). Jest ona zdefiniowana jako transformata Fouriera sygnału okienkowanego w czasie, podczas gdy okno czasowe przesuwa się w czasie. Można to zapisać dla sygnałów ciągłych i dyskretnych odpowiednio w postaci [5]:

$$y(t) = x(t) \cdot w(t) \quad (1)$$

$$y(n) = x(n) \cdot w(n) \quad (2)$$

$$X(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} [x(t) \cdot w(t - \tau)] \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (3)$$

$$X(n, \lambda) = \int_{m=-\infty}^{m=+\infty} [x(n+m) \cdot w(m)] \cdot e^{-j\lambda m} \quad (4)$$

gdzie:

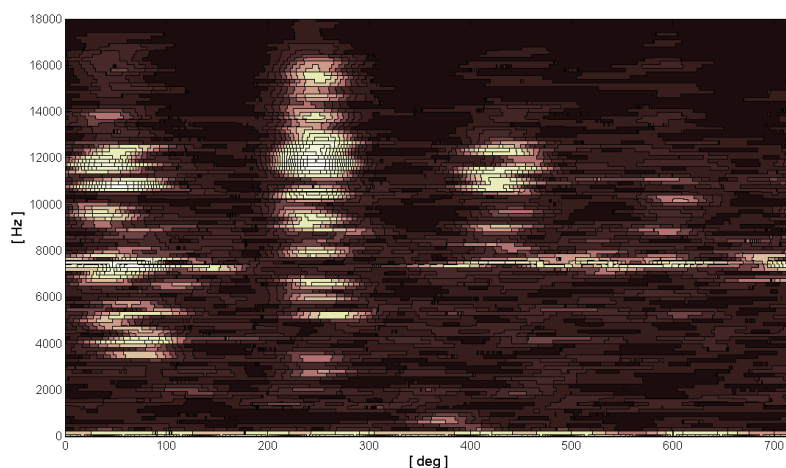
$x(t)$, $x(n)$ - analizowany sygnał odpowiednio ciągły i dyskretny

τ - parametr czasu

λ - parametr częstotliwości

$w(t)$, $w(n)$ - funkcja okna odpowiednio ciągła i dyskretna.

W wyniku przekształcenia otrzymano obraz chwilowego modułu amplitudy drgań w funkcji kąta obrotu wału korbowego i częstotliwości, który został przedstawiony na rysunku 4.



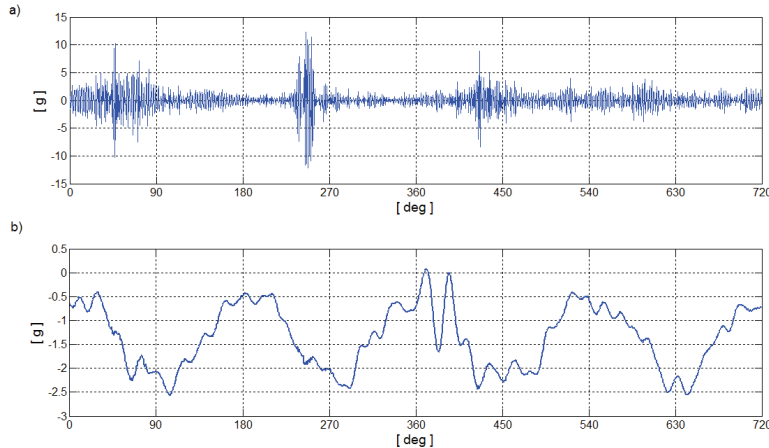
Rys. 4. Analiza częstotliwościowo-amplitudowa sygnału drgań podczas cyklu pracy silnika.

Fig. 4. Time-frequency analysis of vibration signal during one cycle of engine operation.

Z analizy cyklu wynika, że widoczne na rysunku 3 drgania o częstotliwości 7,5 kHz są widoczne niemal podczas całego cyklu pracy silnika i najprawdopodobniej związane są z rezonansem. Występują one również podczas zamykania zaworu wylotowego. Wyższe składowe (10-13 kHz) widoczne w widmie są natomiast związane z zamykaniem zaworów wylotowych. Odpowiedź drganiowa układu na zamykanie zaworu dolotowego charakteryzuje się szerokim spektrum, które jest charakterystyczne dla odpowiedzi na bardzo krótki impuls. Charakterystyki czasowo-częstotliwościowe coraz częściej wykorzystywane są przy analizie wymuszeń impulsowych

generowanych przez układy silnika spalinowego tj. zawory, wtryskiwacze w celach diagnostycznych [6, 7].

W celu dalszej analizy sygnał z akcelerometru poddano filtracji cyfrowej przy pomocy oprogramowania Matlab. Na rysunku 5a przedstawiono sygnał przetworzony filtrem górnoprzepustowym (pasmo przepustowe 5 – 18 kHz), a na rysunku 5b-filtrem dolnoprzepustowym (pasmo przepustowe 0 – 200 Hz). Przedstawione metody preprocessingu sygnału drganiowego mogą służyć różnym celom diagnostycznym. Wysokie częstotliwości charakteryzują procesy przejściowe w silniku, tj. działanie zaworów, pracę tłok-cylinder, proces spalania, natomiast niskie częstotliwości mogą służyć do oceny równomierności pracy cylindrów [8].



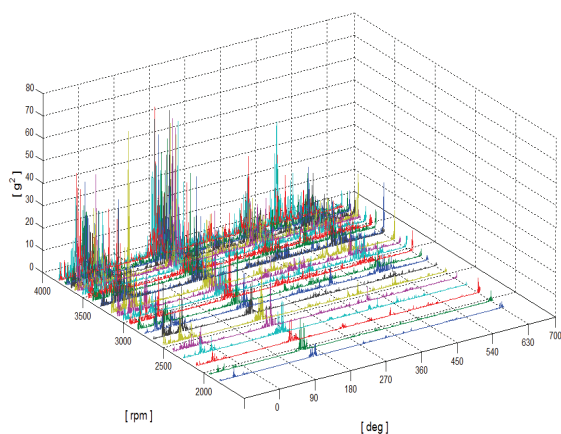
Rys. 5. Sygnał drganiowy z rys. 2 przetworzony przy pomocy a) filtru górnoprzepustowego, b) filtru dolnoprzepustowego.

Fig. 5. Vibration signal presented in Fig. 2 processed with a) highpass filter, b) lowpass filter.

3. Analiza wpływu parametrów pracy na drgania silnika

Chcąc wnioskować na podstawie drgań o stanie silnika on-line w różnych warunkach eksploatacji należy zbadać wpływ parametrów pracy silnika na sygnał drganiowy. Największe znaczenie ma niewątpliwie prędkość obrotowa. Wraz z jej wzrostem rośnie też amplituda sygnału drgań, zwłaszcza składowych będących odpowiedzią na zamykanie zaworów, co jest związane ze wzrostem energii kinetycznej zaworów.

Na rysunku 6 pokazano wartości kwadratów amplitudy drgań, które są miarą proporcjonalną do chwilowej energii drgań bloku silnika podczas rozbiegu. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej rosną amplitudy drgań związane z procesami przejściowymi.



Rys. 6. Chwilowa amplituda drgań podniesiona do kwadratu w funkcji kąta obrotu wału korbowego i prędkości obrotowej.

Fig. 6. Instantaneous squared vibration amplitude versus crankshaft position and rotational speed.

Następnie obliczono wartość skuteczną przyspieszenia drgań w każdym cyklu pracy silnika podczas rozbiegu według wzoru:

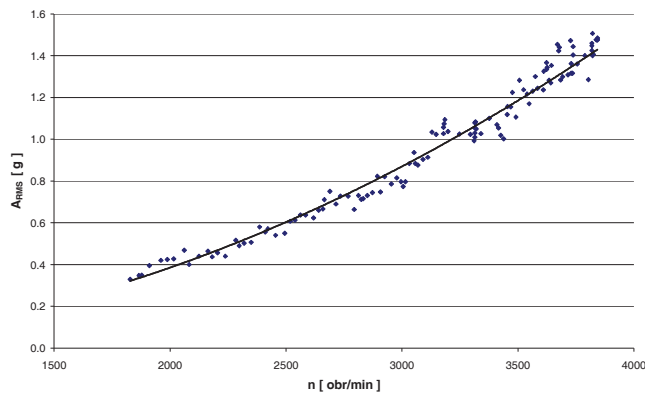
$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [a_i(\varphi)]^2} \tag{5}$$

gdzie:

φ - kąt obrotu wału korbowego

a - chwilowa amplituda drgań [g]

N - liczba próbek w cyklu pracy silnika

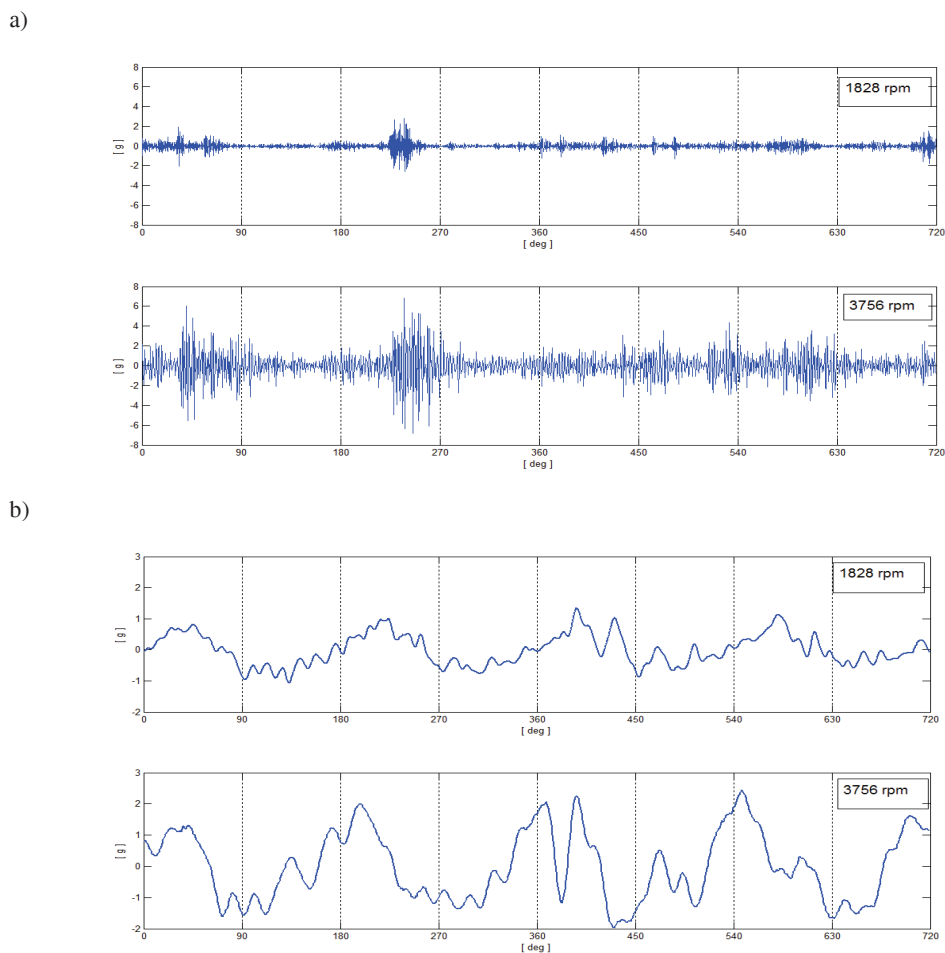


Rys. 7. Wartość skuteczną przyspieszenia drgań podczas cyklu pracy silnika w funkcji prędkości obrotowej.

Fig. 7. Rms vibration amplitude during one cycle of operation versus rotational speed.

Na rysunku 7 przedstawiono wykres zmian miary opisanej wzorem (5) w funkcji prędkości obrotowej silnika.

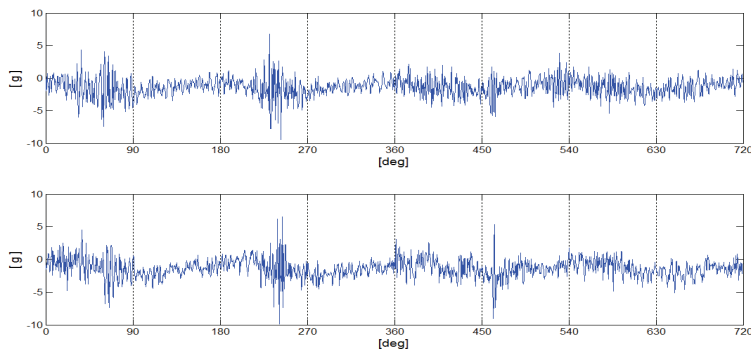
Na rysunku 8 zestawiono przebiegi przyspieszenia drgań podczas cyklu pracy dla różnych prędkości obrotowych i jednakowych obciążeń. Rysunek 8a porównuje drgania w zakresie wysokich częstotliwości (5 - 18 kHz), natomiast rysunek 8b – w zakresie niskich częstotliwości (1 - 200 Hz). Największy udział we wzroście energii mają składowe wysokoczęstotliwościowe. Można również zauważyć zmiany ilościowe sygnału w zakresie niskich częstotliwości.



Rys. 8. Sygnał przyspieszenia drgań bloku silnika podczas cyklu pracy dla obciążenia 70% i prędkości obrotowych 1828 obr/min i 3756 obr/min: a) w zakresie wysokich częstotliwości (5 – 18 kHz), b) w zakresie niskich częstotliwości (1 – 200 Hz).

Fig. 8. Signal of engine vibration during one cycle of operation with 70% load and rotational speed 1828 rpm and 3756 rpm: a) high frequency range (5 – 18 kHz), b) low frequency range (1 – 200 Hz).

Znacznie mniejszy wpływ na amplitudy drgań ma obciążenie silnika mierzone kątem otwarcia przepustnicy. Na rysunku 9 zestawiono przebiegi drgań podczas cyklu pracy dla jednakowych prędkości obrotowych silnika i różnych obciążeń w całym zakresie częstotliwości. Dokładne badanie wpływu obciążenia przy stałej prędkości obrotowej silnika było trudne do przeprowadzenia w warunkach drogowych i należy wykonać je na hamowni podwoziowej.



Rys. 9. Sygnał przyspieszenia drgań bloku silnika podczas cyklu pracy dla prędkości obrotowej 2590 obr/min oraz obciążeń 0 % (hamowanie silnikiem) i około 50 %

Fig. 9. Signal of engine vibration during one cycle of operation with rotational speed 2590 rpm and load 0% and 50%.

Pomiary drgań silnika wykonano również dla różnych nierówności nawierzchni drogowych. Ze względu na tłumienie, wpływ wymuszeń pochodzących od nierówności drogi był nieporównywalnie mniejszy od wymuszeń wewnętrznych silnika. Rozrzut miar drgań z cyklu na cykl na równej drodze był większy od odchyłek spowodowanych nierówną nawierzchnią.

4. Podsumowanie

W artykule dokonano analizy drgań bloku silnika podczas jazdy samochodem w różnych warunkach drogowych. Podczas analizy widmowej ustalono główne składowe częstotliwościowe obecne w sygnale. Wykonano również analizę czasowo-częstotliwościową sygnału, na podstawie której można wyróżnić podczas cyklu pracy silnika odpowiedzi układu na zamykanie zaworów. Ponieważ praca zaworów jest głównym źródłem drgań można przypuszczać, że sygnał drganiowy jest wrażliwy na uszkodzenia zaworów, takie jak wypalenie. Wyznaczono dokładnie wpływ prędkości obrotowej na wartość skuteczną drgań bloku silnika. Porównano też sygnały dla różnych obciążeń przy tej samej prędkości obrotowej. Dalsze badania wpływu obciążenia kontynuowane będą na hamowni podwoziowej.

Wykonane badania i analizy mają prowadzić do powstania wibroakustycznego modelu diagnostycznego silnika spalinowego, który będzie bazą do porównania

sygnału bieżącego, a na podstawie sygnału resztkowego można będzie wnioskować o uszkodzeniach, takich jak np. wypalenie zaworów lub zmiana luzów.

Literatura

- [1] KOMORSKA I.: *Poszukiwania modelu wibroakustycznego silnika spalinowego*. Przegląd Mechaniczny 11'07, 2007, s.11-13.
- [2] KOMORSKA I.: *The diagnostic model proposition of the engine vibration signal*. Journal of KONES, Vol.15, No.2, 2008.
- [3] DĄBROWSKI Z., MADEJ H.: *Maskowanie uszkodzeń mechanicznych przez nowoczesne systemy sterowania silników spalinowych*. Journal of KONES 2006, Vol.13, No 1, 2006.
- [4] ŁAZARZ B., MADEJ H., PERUŃ G., STANIK Z.: *Diagnozowanie uszkodzeń zaworów silnika spalinowego na podstawie analizy drgań*. 4-th International Congress on Technical Diagnostics, Olsztyn 09-12.09.2008.
- [5] SUH IN-SOO: *Application of time-frequency representation techniques to the impact-induced noise and vibration from engines*. SAE Paper 2002-01-0453.
- [6] KOMORSKA I.: *Modeling of vibration signal for reciprocating engine diagnostics*. Diagnostyka 2(50)/2009, s. 23-26.
- [7] RANACHOWSKI Z., BEJGER A.: *Application of wavelet transform for monitoring of operation of high – power Diesel Engine*. Molecular and Quantum Acoustics, 27, Gliwice, 2006.
- [8] RANACHOWSKI Z., BEJGER A.: *Fault diagnostics of the fuel injection system of a medium power maritime diesel engine with application of acoustic signal*. Archives of Acoustics, 30, 4, s.465-472.

Analysis of vibration signal of SI engine during the road test

S u m m a r y

The vibroacoustic signal is used currently in engine diagnostics only to evaluate knock combustion in spark ignition engines. Meanwhile it is a rich source of knowledge not only about the process of combustion, but also about various mechanical defects which happen in driving unit and which concern valves, clutch and gearbox. The paper describes measurements of vibration and additional signals from engine sensors that enable evaluation of work parameters and engine timing control. Investigations were conducted on the road and their purpose was evaluation of influence of rotational speed, load and road surface on engine vibration. The vibration signal was filtered and analyzed with Fourier transform and short-time Fourier transform. Conducted measurements are the base of vibroacoustic diagnostic model that should be worked out for detecting of mechanical defects of valves, pistons etc. in a reciprocating engine.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2010 jako projekt badawczy
N N509 349834*