

Grzegorz M. Szymański
Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu

Franciszek Tomaszewski
Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu

DIAGNOSTYCZNE ASPEKTY CZĘSTOTLIWOŚCI DRGAŃ WŁASNYCH WYBRANYCH ELEMENTÓW SILNIKÓW SPALINOWYCH¹

Streszczenie: W artykule przedstawiono nowe podejście do wibroakustycznej diagnostyki silnika spalinowego. Zaproponowano oszacowanie częstotliwości drgań własnych wybranych elementów silnika spalinowego na podstawie testów impulsowych. Wyniki testów impulsowych zastosowano do budowy modeli dynamicznych układów silnika spalinowego. Modele dynamiczne układów silnika spalinowego można wykorzystać do oceny ich stanu technicznego.

Słowa kluczowe: silnik spalinowy, diagnostyka wibroakustyczna

1. WPROWADZENIE

Silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym (ZS) średniej i dużej mocy stosowane są głównie jako jednostki napędowe pojazdów szynowych. Diagnostowanie ich stanu technicznego pozwala prowadzić strategię obsługi uwarunkowaną stanem technicznym, zapobiegać większości nieplanowanych postojów, a poprzez wykrycie uszkodzeń we wczesnym stadium rozwoju, zmniejszyć zakres i koszty napraw oraz obsługi [1,5]. Odrębnym aspektem są względy bezpieczeństwa przewozów oraz ich terminowość.

Do oceny stanu technicznego lub oceny stanu pracy (parametrów funkcjonalnych i operacyjnych) silnika spalinowego coraz częściej wykorzystywane są miary i charakterystyki sygnału drganiowego generowanego przez silnik spalinowy [2,3,4]. Pozyskanie informacji użytecznej diagnostycznie zawartej w drganiach nie jest łatwe.

¹ Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2011 jako projekt badawczy Nr N N502463034

Trudność identyfikacji i wnioskowania o stanie technicznym lub pracy elementów lub zespołów silnika na podstawie powszechnie stosowanych miar i charakterystyk sygnału wibroakustycznego (WA), wynika między innymi ze złożonej natury drgań generowanych przez silnik, zachodzących w nim procesów, koegzystencji wielu źródeł drgań, a także złożonej kinematyki.

W pracy zostanie przedstawiona koncepcja diagnozowania silników spalinowych wykorzystująca analizę częstości drgań własnych struktury silnika.

2. IDENTYFIKACJA CZĘSTOTLIWOŚCI DRGAŃ WŁASNYCH WYBRANYCH ELEMENTÓW SILNIKA SPALINOWEGO

Jako wektor sygnału do oceny stanu technicznego silnika spalinowego wykorzystywane są parametry procesów towarzyszących, roboczych oraz parametry procesów wykorzystywanych w badaniach nieniszczących (np. ultradźwięki). Wielkościami opisującymi procesy robocze stosowanymi w diagnostyce silników spalinowych są: moc, moment obrotowy i reakcyjny, chwilowa prędkość kątowna i kąt skręcenia wału korbowego itp.; są one stosowane jako uogólnione parametry stanu technicznego silnika.

Parametry procesów towarzyszących (drgania, hałas, procesy termiczne, zużycia itp.) są stosowane do diagnozowania szczegółowego stanu technicznego silnika oraz lokalizacji niezdatności. Do najczęściej wykorzystywanych procesów towarzyszących w diagnostyce silników spalinowych należą procesy wibroakustyczne (drgania i hałas).

Silnik spalinowy podczas pracy generuje drgania, które są zjawiskami towarzyszącymi głównych procesów zachodzących w zespołach silnika. Do oceny stanu technicznego silników spalinowych można zastosować składowe drgań, które są powiązane z częstotliwościami wymuszeń generowanych przez zespoły, pary kinematyczne i elementy silnika lub częstotliwościami drgań własnych elementów. W niniejszym opracowaniu skupiono się na diagnostyce wykorzystującej zjawiska drgań własnych elementów silnika spalinowego.

W celu opracowania metody diagnozowania silników spalinowych bazującej na analizie drgań własnych wykonano testy impulsowe wybranych (głównych) elementów składowych silnika ze szczególnym uwzględnieniem układu tłokowo-korbowego a następnie porównano wartości częstotliwości drgań własnych tych elementów lub zespołów z częstotliwościami, jakie można zaobserwować w trakcie analizy widmowej sygnału drganiowego generowanego podczas pracującego silnika. Na podstawie zmian amplitud w poszczególnych pasmach częstości można wnioskować o zmianie stanu technicznego elementów lub zespołów silnika spalinowego.

2.1. Metodyka badań

Obiektem badań były wybrane elementy silnika spalinowego 2112 SSF. Silnik ten jest stosowany między innymi do napędu lokomotyw spalinowych serii SU/P 45, agregatów prądotwórczych oraz jako silniki pomocnicze jednostek pływających. Jest to widlasty,

średnio obrotowy silnik czterosurowy z wtryskiem bezpośrednim, doładowany dwoma turbosprężarkami z chłodzeniem powietrza doładowującego.

Badania dotyczące wyznaczenia częstotliwości drgań własnych elementów i zespołów silnika spalinowego przeprowadzono w oparciu o założenia eksperymentu czynnego. Eksperyment czynny polega na celowej zmianie parametrów wejściowych lub zakłócających i obserwacji wpływu tych zmian na parametry wyjściowe. Za parametr wejściowy przyjęto siłę wymuszającą w testach impulsowych, natomiast za parametry wyjściowe przyspieszenia drgań wybranych elementów i zespołów silnika spalinowego.

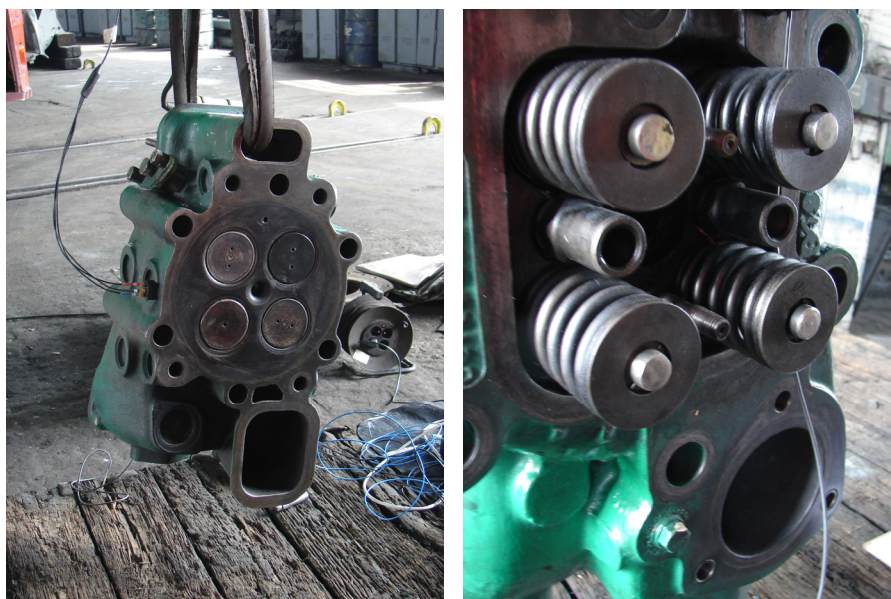
Do badań zastosowano trójosiowe przetworniki drgań typu 4504A firmy Brüel&Kjær, liniowe pasmo przenoszenia wybranych przetworników wynosiło 9 kHz. W czasie badań rejestrowano sygnały w paśmie 0,1 Hz - 9 kHz. Częstotliwość próbkowania wynosiła 32768 Hz. Oznacza to, że pasmo poddane analizie zgodnie z zależnością Nyquista może wynosić do 16 kHz.

Przetworniki drgań zamocowano do elementów zespołów silnika spalinowego za pomocą wosku pszczelego. Taki sposób mocowania przetworników nie zawęży pasma analizy wynikającej z charakterystyki przetwornika. Kierunki pomiaru drgań zorientowano następująco: Kierunek X równoległy do osi wału korbowego, kierunek Z równoległy do osi cylindra oraz kierunek Y prostopadły do kierunków X i Z.

Wymuszenia impulsowego dokonywano za pomocą młotka modalnego typu 8206-002 firmy Brüel&Kjær. Do rejestracji sygnałów drgań oraz wymuszeń zastosowano Multianalizator PULSE firmy Brüel&Kjær. Urządzenie pozwala rejestrować przebiegi szybkozmienne równoległe na 17 kanałach z dynamiką do 160 dB.

Badania przeprowadzono dla następujących elementów i zespołów silnika spalinowego 2112 SSF: wału korbowego, korbowodu, tłoka, głowicy (z zamontowanymi zaworami). Elementy powieszono na linie i poddano testom impulsowym.

Na rysunku 1 pokazano głowicę silnika 2112 SSF przygotowaną do przeprowadzenia badań dotyczących oszacowania częstotliwości drgań własnych.



Rys. 1. Widok głowicy na stanowisku badawczym

2.2. Analiza wyników badań

W celu oszacowania częstotliwości drgań własnych wybranych elementów/zespołów silnika spalinowego 2112 SSF wykonano testy impulsowe. Zarejestrowane sygnały przyspieszeń drgań poddano analizie w dziedzinie częstotliwości. Analiza taka polega na wyznaczeniu szeregu charakterystyk, które przedstawiają zależności różnych wielkości (np. amplitudy, mocy, fazy) od częstotliwości.

W trakcie analiz wykonano uśrednianie i normowanie widm amplitudowych. Normowanie umożliwiło porównywanie widm wyznaczonych dla różnych sił wymuszających, natomiast uśrednianie miało na celu zminimalizowanie wpływu szumów na wyniki analiz sygnałów.

W pracy przedstawiono graficzną prezentację wyników wybranego zespołu silnika – głowicy cylindrów.

Głowice (po jednej na każdy cylinder) są wykonane z żeliwa stopowego z dodatkiem krzemu i manganu. Głowice silników 2112 SSF wyposażone są w cztery zawory, wtryskiwacz, zawór służący do-indykowania. Do kadłuba silnika są mocowane za pomocą śrub dwustronnych. Głowica silnika spalinowego jest zespołem o dużym stopniu złożoności. Podczas pracy silnika na głowicę działają siły wymuszające jej drgania, będące wynikiem następujących procesów fizycznych i chemicznych:

- spalanie mieszanki palnej w cylindrze,
- przepływ czynnika chłodzącego, gazów dolotowych i wylotowych oraz paliwa przez wtryskiwacz,
- bezwładność elementów układu rozrządu,
- zderzenia elementów głowicy.

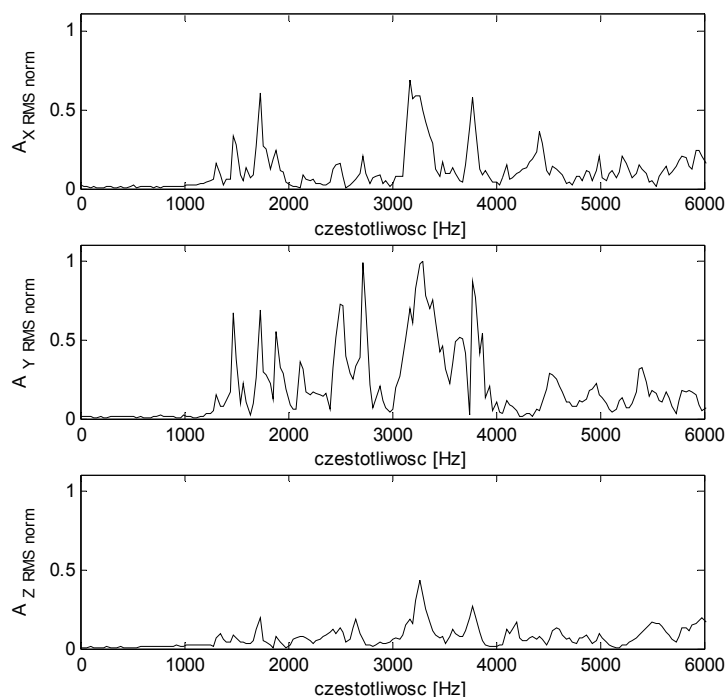
Na rysunku 2 przedstawiono unormowane uśrednione widma amplitudowe sygnałów przyspieszeń drgań (w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach) zarejestrowanych na głowicy silnika 2112 SSF.

Na podstawie przeprowadzonych analiz oszacowano częstotliwości, które są częstotliwościami drgań własnych elementów silnika spalinowego 2112 SSF i zamieszczono je w tabelicy 1.

Tablica 1

Szacowane wartości częstotliwości drgań własnych elementów/zespołów silnika spalinowego typu 2112 SSF

Element/zespół	Częstotliwość [kHz]						
	Wał korbowy	4,3	5,2	5,5	5,6		
Korbowód	1,0	1,7	2,9	3,1	5,1	5,8	
Tłok	2,4	4,4	5,2	5,5			
Tłok z korbowodem	0,8	1,3	2,3	4,4			
Głowica	1,5	1,7	2,5	3,3	3,8	4,5	5,5

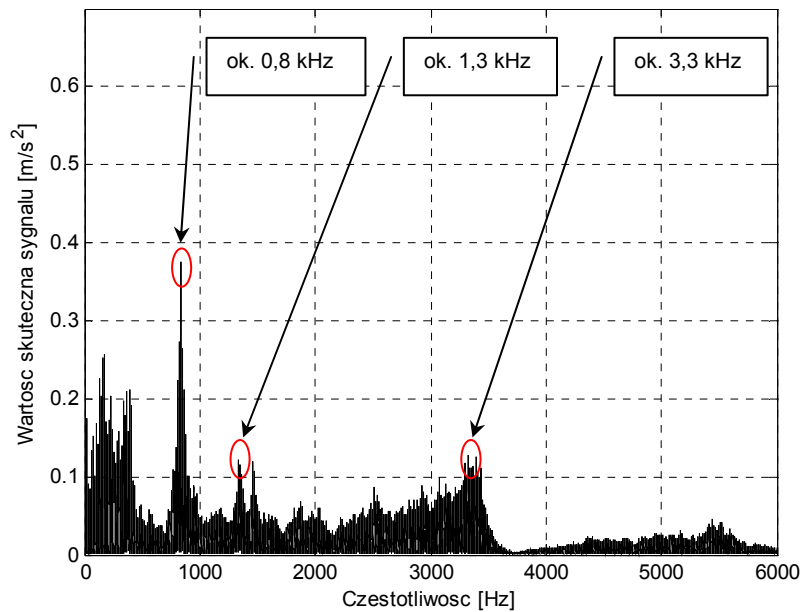


Rys. 2. Unormowane uśrednione widma z sygnału przyspieszeń drgań dla przetwornika zamocowanego na głowicy

Kolejnym etapem analizy wyników badań było poszukiwanie oszacowanych wartości częstotliwości drgań własnych w sygnałach zarejestrowanych na pracującym silniku spalinowym 2112 SSF. Przeanalizowano dwa rodzaje sygnałów zarejestrowanych na głowicach silnika. W pierwszym przypadku analizie poddano sygnały zarejestrowane na cylindrze, w którym nie występowało spalanie. Pozwoliło to na oszacowanie częstotliwości generowanych przez zderzenia elementów (kasowanie luzów), na które działały siły bezwładności. W wariancie drugim analizowano sygnały, pozyskane z cylindra, w którym występował proces spalania. Umożliwiło to pozyskanie informacji o częstotliwościach generowanych przez elementy, na które działają duże siły impulsowe będące efektem spalania ładunku w cylindrze.

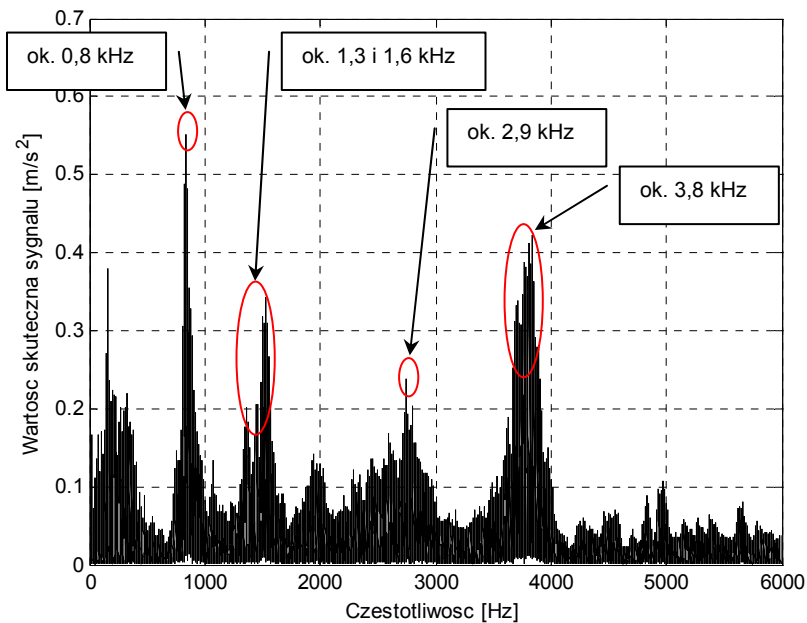
Na rysunku 3 przedstawiono uśrednione widmo z sygnału przyspieszeń drgań dla przypadku, w którym w badanym cylindrze nie zaszedł proces spalania.

W widmie przedstawionym na rysunku 3 zaznaczono częstotliwości ok. 0,8; 1,3 i 3,3 kHz. Dwie pierwsze składowe (0,8 i 1,3 kHz) mogą być związane z pracą zespołu tłoka z korbowodem natomiast składowa 3,3 kHz może być wynikiem pracy elementów głowicy.



Rys. 3. Uśrednione widma z sygnału przyspieszeń drgań (w badanym cylindrze nie zaszedł proces spalania)

Na rysunku 4 przedstawiono uśrednione widmo z sygnału przyspieszeń drgań dla przypadku, w którym w badanym cylindrze występował proces spalania.



Rys. 4. Uśrednione widma z sygnału przyspieszeń drgań (w badanym cylindrze proces spalania był prawidłowy)

Widmo przedstawione na rysunku 4 zawiera więcej częstotliwości, które mogą być częstotliwościami drgań własnych elementów silnika

Dwie pierwsze składowe (0,8 i 1,3 kHz) mogą być związane z pracą zespołu tłoka z korbowodem, składowa 1,6 i 2,9 kHz może być związana z pracą korbowodu natomiast składowe 3,8 kHz może być wynikiem pracy elementów głowicy.

4. PODSUMOWANIE

W trakcie badań do oceny stanu technicznego silnika spalinowego wykorzystano charakterystyki sygnałów drganiowych. Analiza przedstawionych wyników badań wykazała, że znajomość częstotliwości drgań własnych elementów i zespołów silnika spalinowego umożliwia zwiększenie dokładności określenia ich stanu technicznego.

Znajomość częstotliwości drgań własnych elementów i zespołów silnika spalinowego umożliwia zbudowanie modelu propagacji drgań w silniku, co z kolei umożliwia zastosowanie nowego trendu w diagnostyce tzn. diagnozowanie z wykorzystaniem modelu.

Diagnozowanie z wykorzystaniem modelu wymaga zbudowania systemu diagnostycznego, którego struktura zawiera model, dzięki któremu można zadawać niezdatności układu i porównywać symptomy generowane przez obiekt rzeczywisty z symptomami określającymi stany wygenerowane przez model. Znajomość modelu umożliwia opracowanie algorytmu oceny stanu technicznego zespołów silnika spalinowego.

Bibliografia

1. Cempel C.: Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn, WNT Warszawa 1982.
2. Niziński S., Michalski R., "Diagnostyka obiektów technicznych", Biblioteka Problemów Eksploatacji Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Katedra Eksploatacji Pojazdów i Maszyn Wydziału Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu, 2002.
3. Szymański G.M., Czechura B., Tomaszewski F.: Assessment of camvalves clearance in internal combustion engine based on parameters of vibration – methodological assumption, Combustion engines No. 1/2004(118).
4. Szymański G.M.: Analiza możliwości zastosowania wybranych charakterystyk sygnału drganiowego do diagnostyki silnika spalinowego. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 2005.
5. Tomaszewski F.: Zagadnienia wyznaczania stanu technicznego złożonego obiektu mechanicznego za pomocą sygnału wibroakustycznego. Politechnika Poznańska – Rozprawy nr 337 (Praca habilitacyjna), Poznań 1998.

DIAGNOSTIC ASPECTS NATURAL FREQUENCY OF SELECTED ELEMENTS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Abstract: This article presents a new approach to vibroacoustic diagnostics of internal combustion engine. Selection of test points of vibration on the basis of impact tests' results was suggested. Those results were applied to build dynamic models of systems of combustion engines. Such model was used to asses condition of the systems.

Keywords: internal combustion engine, diagnostic, vibroacoustic