

DIAGNOSIS OF INJECTION PUMP DEFECTS BY VIBRATION ANALYSIS IN HIGH PRESSURE FUEL INJECTED ENGINES

Andrzej Kaźmierczak, Radosław Wróbel

Wroclaw University of Technology ,
Institute of Machine Design and Operation
I. Łukaszewicza 7/9, 50-371 Wrocław, Poland
e-mail: andrzej.kazmierczak@pwr.wroc.pl
radoslaw.wrobel@pwr.wroc.pl

Abstract

Nowadays, digital signal processing is one of the most dynamic domains of engineering. It may be useful to apply it to the diagnosis of automotive engines. Digital signal processing seems to be particularly useful in the analysis of acoustic vibrations generated by engines and may be developed into a useful diagnostic tool.

In the first part of the paper, the evolution of the digital signal processor is presented. The principles and practices of DSP operation are compared to those of classical processors. The second part of the paper presents a method to diagnosis malfunctioning internal combustion engines by comparing the vibration spectrum from efficient and inefficient engines. To measure the vibration, an accelerometer was attached to the valve cover and wired to an acquisition card with conditioning circuits. The data was analyzed using short timed, Fast Fourier Transforms with characteristic parametric and non-parametric time windows.

The subject of the research was 1.9 TDi AWX type diesel engine. A malfunctioning engine was simulated by unplugging one of the injection pumps.

Keywords: digital signal processing, vibroacoustic, combustion engines' defects, DSP, FFT, injection pump

WYKRYWANIE USZKODZENIA POMPOWTRYSKIWACZA W SILNIKU O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM PRZEZ ANALIZĘ DRGAŃ

Streszczenie

Przetwarzanie cyfrowe (Digital Signal Processing) jest obecnie jedną z najbardziej dynamicznych dziedzin inżynierii. Wydaje się koniecznym wprowadzenie nowej dziedziny do diagnostyki pojazdów samochodowych, a zwłaszcza silników spalinowych. Szczególnie przydatne jest użycie cyfrowego przetwarzania w analizie drgań wibroakustycznych, generowanych przez silnik jak i – w przyszłości, analizie obrazów.

W pierwszej części pracy przedstawiono zarys historyczny rozwoju procesorów, przeznaczonych do cyfrowego przetwarzania sygnałów oraz podstawę ich działania, wyróżniając ich zalety w stosunku do układów klasycznych. Druga część pracy przedstawia metodę diagnozowania uszkodzonego silnika spalinowego przez komparację widma drgań wibroakustycznych, pochodzących od silnika sprawnego i uszkodzonego. Czujnikiem drgań był akcelerometr, umieszczony na obudowie głowicy, sprzężony przez układy kondycjonujące z kartą akwizycji pomiaru. Przy analizie otrzymanych sygnałów wibroakustycznych, użyto krótkoczasową, szybką transformatę Fouriera z zastosowaniem charakterystycznych okien czasowych parametrycznych i nieparametrycznych.

Przedmiotem badań był silnik o zapłonie samoczynnym typu 1,9 TDi AWX, z układem zasilania w paliwo wyposażonym w pompowtryskiwacze. Modelowanie uszkodzenia polegało na zasymulowaniu awarii jednego z pompowtryskiwaczy.

Słowa kluczowe: cyfrowe przetwarzanie sygnałów, drgania wibroakustyczne, usterki silników tłokowych, DSP, FFT, pompowtryskiwacz

1. Wstęp

Diagnostyka silników spalinowych wykorzystuje osiągnięcia rozwojowych dziedzin nauki. Praca opisuje jeden ze sposobów detekcji uszkodzeń silnika poprzez analizę drgań. Opisana metoda oparta jest na cyfrowym przetwarzaniu sygnałów (DSP/CPS). Charakteryzuje ją krótkoczasowa analiza drgań i wykorzystanie okien czasowych. Możliwe jest zaimplementowanie tej metody do torów diagnostycznych, np. należących do Europejskiego Standardu Diagnostyki Pokładowej - EOBD kolejnej generacji, przez wykorzystanie procesorów sygnałowych i dedykowanych czujników (akcelerometrów). Celem autorów jest rozpowszechnienie metody, opartej na DSP w diagnostyce pojazdów samochodowych, a w szczególności - silników spalinowych.

Obiektem badań był silnik Volkswagena 1,9TDi AWX (285Nm/96kW). Zasada działania tego silnika jest oparta na sterowanym elektronicznie bezpośrednim wtrysku paliwa przez pompowtryskiwacze. Jednym z uszkodzeń, które może spowodować poważne następstwa jest odłączenie lub przerwy w pracy jednego z pompowtryskiwaczy.

2. Cyfrowe Przetwarzanie Sygnałów – DSP

Nazwa DSP dotyczy zarówno Cyfrowego Przetwarzania Sygnałów, jak i Cyfrowych Procesorów Sygnałowych. Należy nadmienić, że panują tutaj dwa poglądy; w pierwszym mówi się tylko o cyfrowym przetwarzaniu sygnałów i dedykowanych ku temu procesorom w drugim używa się DSP jako oznaczenia zarówno przetwarzania, jak i procesorów. Bez względu na pogląd, nie należy stosować tych dwóch wyrażań jako synonimu; procesory sygnałowe umożliwiają tylko implementacje algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów do toru diagnostycznego.

W roku 1952 Geoffrey Dummer, członek zespołu pracującego dla brytyjskiego ministerstwa obrony zaproponował, aby kilka elementów elektronicznych zintegrować w jednej małej obudowie, jako samodzielny układ, wykonujący konkretną operację na sygnale elektrycznym. Tak powstał projekt pierwszego układu scalonego. Należy dodać, że pierwsze zgłoszenie patentowe, dotyczące układu scalonego, pochodzi z 1958 roku i należy do Texas Instruments, jednego z największych obecnie potentatów w produkcji układów scalonych (a także procesorów sygnałowych) [1]. Budowanie układów zintegrowanych doprowadziło w końcu do powstania pierwszego mikroprocesora (zresztą przez pomyłkę w firmie Intel) – czyli układu programowalnego w ujęciu klasycznym.

Różnica pomiędzy procesorem sygnałowym, a konwencjonalnymi mikroprocesorami nie leży tylko w zastosowaniu, ale także w architekturze. Konwencjonalny mikroprocesor wyróżnia (zazwyczaj) tylko jedna magistrala systemowa, którą są przekazywane zarówno instrukcje, jak i dane pomiędzy poszczególnymi częściami układu (architektura von Neumanna). Szybkość, wymagana w przetwarzaniu cyfrowym, uwarunkowała istnienie dwóch oddzielnych magistrali (dla danych i dla instrukcji) – architektura harwardzka. W przypadku najnowszych, zmiennoprzecinkowych procesorów stosuje się często nawet siedem magistral, służących m. in. do wykonywania instrukcji wejścia/wyjścia [2]. W konwencjonalnych mikroprocesorach niedogodność, wynikającą z zastosowania tylko jednej magistrali, łagodzi się przez wprowadzenie różnego typu technik przetwarzania, mających na celu przyspieszenie pracy układu. Często jest stosowane przetwarzanie potokowe, polegające na równoczesnym przetwarzaniu instrukcji w jednostce wykonawczej EU (ang. *Execution Unit*) i pobieraniu następnej instrukcji przez magistralę BU (ang. *Bus Unit*). Innym zabiegiem, wprowadzonym w rozwojowej rodzinie konwencjonalnych mikrokontrolerów firmy Atmel (rodzina AVR), jest słowo instrukcji wydłużone do 16 bitów, mimo że cały układ jest zaliczany do układów 8-bitowych [3]. Wszystkie wymienione tutaj zabiegi zostały zapożyczone do procesorów sygnałowych. W wielu procesorach sygnałowych wykorzystuje się przetwarzanie potokowe, które w tym przypadku polega na

równoległej pracy na kilku instrukcjach. Powoduje to znaczne przyspieszenie pracy, ale jednocześnie może wywołać konflikt przetwarzania, polegający na wykonaniu najpierw tych instrukcji, które wymagają mniej cykli zegarowych, z pominięciem kolejności instrukcji zapisanych w programie.

Główna różnica pomiędzy procesorem sygnałowym, a mikrokontrolerem leży w szybkości przetwarzania informacji. Procesory klasyczne i sygnałowe operują na sygnale dyskretnym w dziedzinie czasu i wartości. Jednak prędkość przetwarzania procesora sygnałowego, pozwala na wykonywanie operacji matematycznych (jak zastosowanie okna czasowego czy transformowanie do dziedziny częstotliwości), na podstawie których możliwe jest podejmowanie decyzji w czasie quasi rzeczywistym. Klasyczne procesory podejmują decyzje tylko na podstawie odebranego pojedynczego bitu czy słowa w sensie cyfrowym. Z tego wynika kolejna różnica; układy konwencjonalne pracują na sygnałach deterministycznych, natomiast procesory sygnałowe mogą pracować także na sygnałach stochastycznych. Z pewnością drgania silnika, zwłaszcza uszkodzonego, można określić jako stochastyczne. Dążeniem autorów, jak i innych badaczy, jest przekształcenie charakteru drgań konkretnego silnika ze stochastycznych na deterministyczne.

W artykule opisano jedną z metod transformacji sygnału; krótkoczasową, szybką transformatę Fouriera, wzbogaconą o filtrację przez zastosowanie okien czasowych.

3. Wysokociśnieniowe metody wtrysku paliwa

Znaczna część silników o zapłonie samoczynnym jest wyposażona w układy wtrysku, odbiegające od układów klasycznych, opartych na pompie wtryskowej, połączonej przewodami wtryskowymi z wtryskiwaczami. Najpopularniejszym ostatnio układem „nie klasycznym” jest Common Rail. System ten, oparty jest o stałą pracę pompy, wytwarzającej ciśnienie, stabilizowane w akumulatorze ciśnienia. Wtryskiwacze sterowane są decyzyjnie. Ciśnienie wtrysku jest nawet kilkanaście razy większe od ciśnienia wytwarzanego przez klasyczny układ.

Inną metodą elektronicznie sterowanego wtrysku są pompowtryskiwacze. Umożliwiają one wytworzenie nawet większego ciśnienia niż układ Common Rail, ale są droższe w wykonaniu, zostaną więc wyparte przez konkurenta (Common Rail). Mimo to duża grupa pojazdów (głównie produkowanych w koncernie VW) jest wyposażona w ten rodzaj wtrysku i stanowi niebagatelną część rynku.

Układ oparty o pompowtryskiwacze został wprowadzony po raz pierwszy w 1993r. w USA. Budowa oparta jest o następujące komponenty [4]:

1. Napędzanego mechanicznie pompowtryskiwacza z zaworem elektromagnetycznym.
2. Mikroprocesorowej jednostki decyzyjnej ECM.
3. Paliwowej pompy podającej.
4. Czujników: prędkości obrotowej, ciśnienia doładowania i atmosferycznego, temperatury i ciśnienia paliwa, temperatury i ciśnienia oleju, temperatury powietrza i cieczy chłodzącej, włączenia sprzęgła i hamulców pojazdu, położenia pedału przyśpieszenia.

Wtrysk paliwa odbywa się, gdy jednostka decyzyjna wyśle odpowiedni impuls sygnałowy do zaworu elektromagnetycznego, który zamyka połączenie komory wtryskowej pompowtryskiwacza z układem przelewowym umożliwiając wzrost ciśnienia paliwa w tej komorze i w następstwie uniesienie iglicy wtryskiwacza i wtrysk paliwa do komory spalania.

Oprócz wymienionych tutaj metod wtryskiwania paliwa, należy wspomnieć także o mniej popularnym układzie typu Cummins Celect [7].

4. Metodyka pomiaru

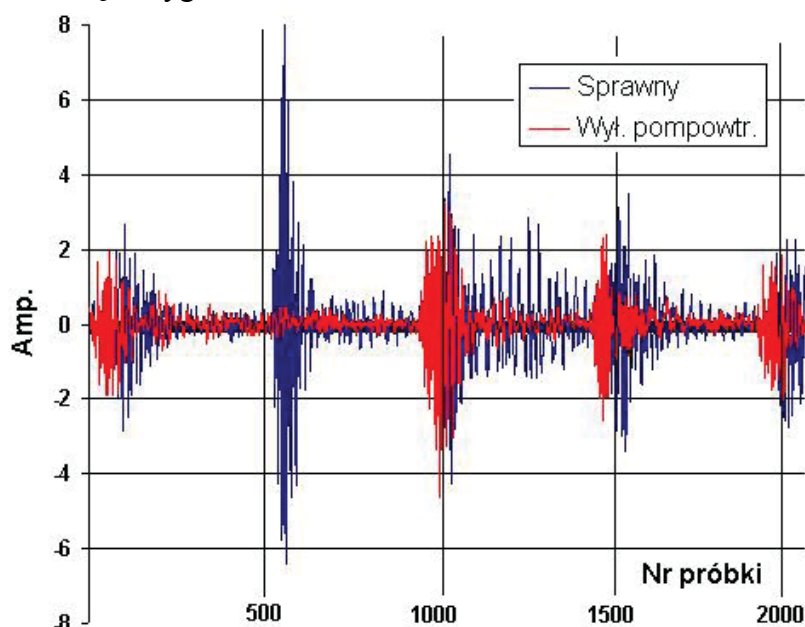
Obiektem badań był silnik o zapłonie samoczynnym typu 1,9TDi AWX. Czujnik drgań w postaci akcelerometru umieszczono na metalowej części obudowy głowicy. Pomiar drgań

oparty był o doświadczenie, składające się z 2048 próbek (częstotliwość próbkowania 500Hz). W pierwszej fazie projektu zbadano silnik sprawny, w drugiej po odłączeniu pompowtryskiwacza, symulując uszkodzenie zaworu elektromagnetycznego bądź jednostki decyzyjnej. Pomiary wykonano na hamowni silnikowej ze stałymi parametrami (prędkość obrotowa 2070rpm, moment 62Nm). W wyniku pomiaru otrzymano charakterystykę drgań silnika, zamieszczoną na rys. 1. Przyjęto, po weryfikacji w badaniach, że proces spalania jest zjawiskiem okresowym o charakterze zależnym od temperatury, momentu i prędkości obrotowej. Przy czym synchronizacja sygnału czasowego nie jest konieczna. Wynika to z własności przekształcenia Fouriera, którego moduł jest niewrażliwy na przesunięcie sygnału [6] (1).

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n - n_0) e^{-j\Omega n} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m) e^{-j\Omega(m+n_0)} = e^{-j\Omega n_0} \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m) e^{-j\Omega m} = e^{-j\Omega n_0} X(e^{j\Omega}), \quad (1)$$

gdzie:

- Ω – pulsacja,
- $X(e^{j\Omega})$ – widmo sygnału,
- n_0 – „przesunięcie sygnału”.



Rys.1. Przebieg drgań silnika sprawnego (niebieski) i niesprawnego (wąski)
Fig.1. Sequence of vibrations for efficient (blue) and inefficient engine (narrow)

Otrzymane wyniki przewyższyły oczekiwania autorów. Największa różnica drgań (pomiędzy 450, a 650 próbką) wprost identyfikuje wyłączenie pompowtryskiwacza. Wielkość amplitudy drgań, wyróżniająca ten obszar, związana jest z usytuowaniem czujnika (właśnie w okolicy wyłączanego, trzeciego pompowtryskiwacza). Można zauważyć także inne obszary charakterystyczne, zwłaszcza pomiędzy 1050, a 1450 próbką; silnik sprawny wykazuje tutaj znaczne drgania o charakterze szumu, które są tłumione przy silniku z wyłączonym pompowtryskiwaczem. Sygnał w dziedzinie czasu nie umożliwia wykonywania szybkich i funkcjonalnych analiz, dlatego została przeprowadzona operacja przejścia na dziedzinę częstotliwości. Wybrano szybkie przekształcenie Fouriera (2), znając parametry badanego sygnału (przede wszystkim skończoną energię)(3). FFT nie wymaga wielkiej liczby obliczeń (w wypadku dyskretnego przekształcenia jest to N^2 obliczeń, gdzie N to liczba próbek [2]).

$$X_k = \sum_{n=1}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} nk}, \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (2)$$

gdzie:

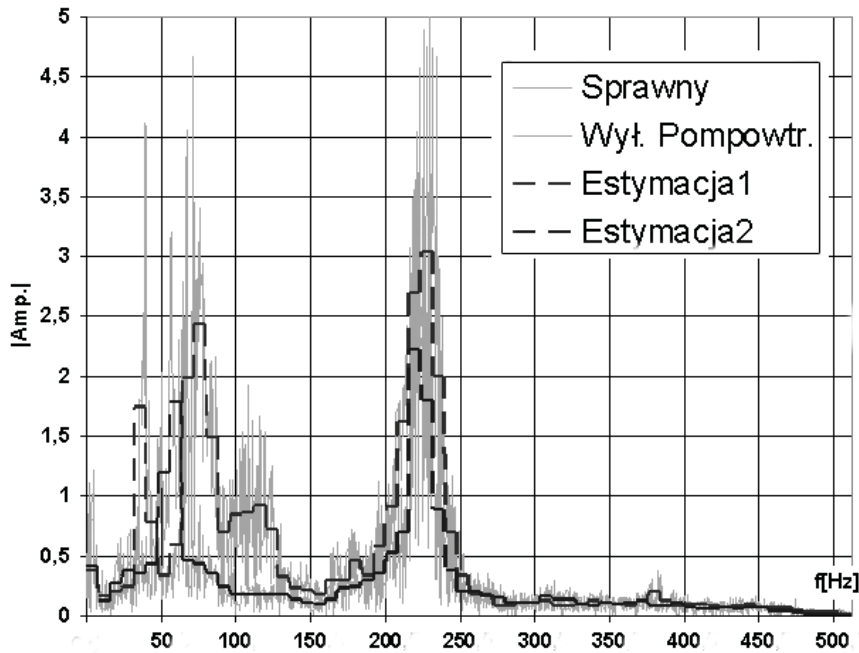
- X_k – szereg,
- N – liczba próbek,
- x_n – próbka,
- k – iteracja.

$$\sum_{n \in \mathbb{R}} x^2(n) < \infty, \quad (3)$$

gdzie:

- $x^2(n)$ – energia sygnału.

W wyniku przekształcenia otrzymano widmo sygnału (rys. 2).



Rys.2. Widmo drgań silnika sprawnego (niebieski) i niesprawnego
Fig.2. Spectrum of vibration for efficient (blue) and inefficient engine

Największe zmiany, po odłączeniu pompowtryskiwacza są zauważalne przy niskich częstotliwościach w granicy 50 – 100Hz. Analiza sygnałów przez selektywizację nazywana jest analizą krótkoczasową. Wymaga ona zastosowania przesuwanych okien czasowych. Stosowanie okna polega na pomnożeniu próby sygnału i dyskretnej funkcji okna (w dziedzinie czasu, będącej w tym wypadku funkcją zespoloną, konieczny jest splot funkcji)[2][6].

5. Okno Hamminga i Hanna

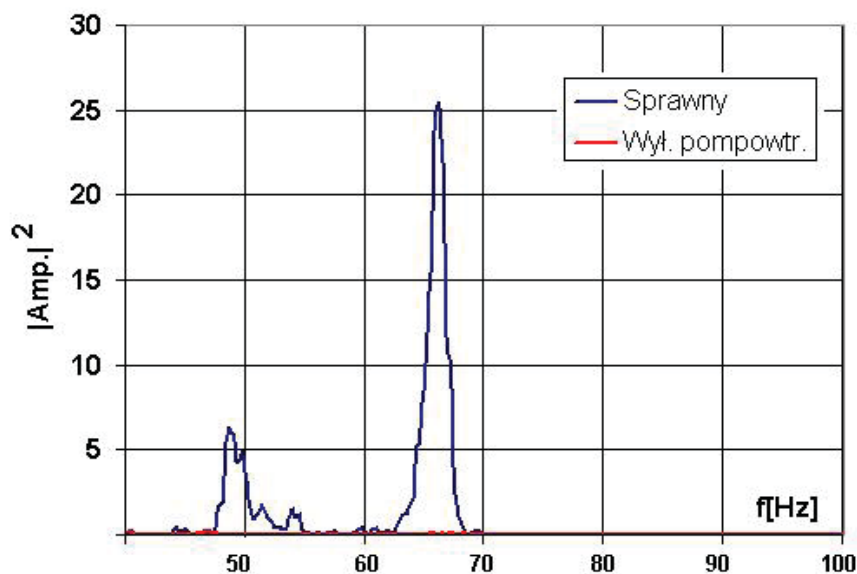
Nazywane jest oknem cosinusowym (4).

$$\Gamma_j = 0.53836 - 0.46164 \cos\left(2\pi \frac{j}{M-1}\right), \quad (4)$$

gdzie:

- Γ_j – okno,
- M – liczba próbek,
- j – iteracja.

Ten rodzaj okna charakteryzuje się dobrą rozdzielczością, przywiązując największą wagę obserwacji, leżącej w obszarze listka głównego [5]. Otrzymany periodogram, po zastosowaniu tego rodzaju okna oraz filtru pasmowo przepustowego przedstawia rys. 3.



Rys.3. Periodogram przedstawiający porównanie okienkowe drgań silnika sprawnego i niesprawnego (czerwony).

Wykorzystano okno Hamminga

Fig.3. Periodogram comparison of window vibrations of an efficient and an inefficient engine.

Hamming's window has been used

Innym rodzajem okna o wysokiej rozdzielczości jest okno Hanna. Tutaj także wykorzystywana jest funkcja cosinus. Różni się wartościami współczynników (5) od okna Hamminga. Współczynniki te zmniejszają dynamikę sygnału wyjściowego, przy zwiększeniu rozdzielczości.

$$Hann_j = 0.5 \cdot \left(1 - \cos \left(2\pi \frac{j}{M-1} \right) \right), \quad (5)$$

gdzie:

- Hann_j – okno,
- M – liczba próbek,
- j – iteracja.

Otrzymany periodogram nie wprowadza dodatkowych informacji o sygnale. Podobnie jak w przypadku zastosowanego okna Hamminga, wyraźnie można zauważyć całkowite odfiltrowanie sygnału, pochodzącego od uszkodzonego silnika.

6. Okno Nuttalla

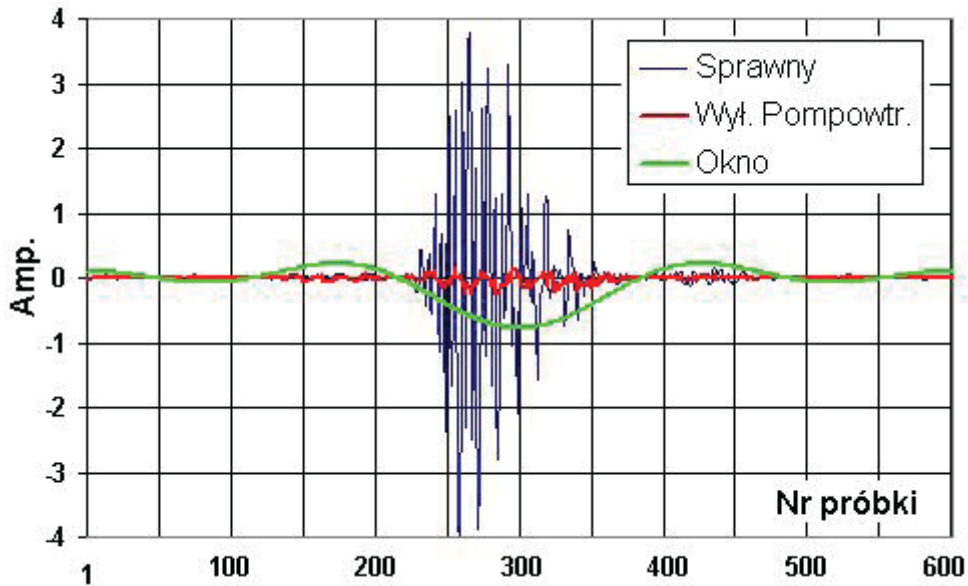
Odmienne od okien opisanych powyżej, okno Nuttalla charakteryzuje się znaczną dynamiką, kosztem rozdzielczości [5] (6).

$$\Psi_j = a_0 - a_1 \cdot \cos \left(2\pi \frac{j}{M-1} \right) + a_2 \cdot \cos \left(4\pi \frac{j}{M-1} \right) - a_3 \cdot \cos \left(6\pi \frac{j}{M-1} \right), \quad (6)$$

gdzie:

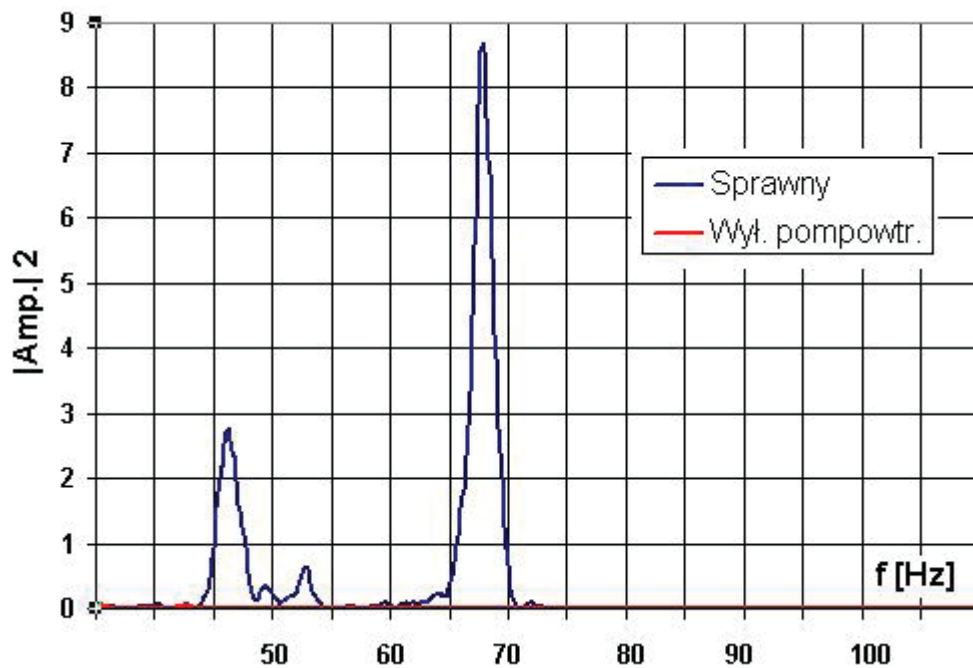
- Ψ_j – okno,
- a_0 – 0,36,
- a_1 – 0,49,
- a_2 – 0,14,
- a_3 – 0,01,
- M – liczba próbek,
- j – iteracja.

Okno wyróżnia charakter szeregu z malejącymi współczynnikami. Rys. 4 przedstawia to okno i sygnał wyjściowy.



Rys. 4. Okno Nuttalla (zielony) i sygnał pochodzący od sprawnego silnika po zastosowaniu okna
 Fig.4. Nuttall's window (green) and signal which originated windowed from an efficient engine

Zauważalne jest większe tłumienie całego sygnału, wynikające z mniejszych wartości częstotliwości przy listku głównym. Podobnie jak w przypadku okna Hamminga i Hanna, przeprowadzono operację przejścia do dziedziny częstotliwości z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera FFT (2)(3)(rys. 5).



Rys.5. Periodogram drgań silnika sprawnego i niesprawnego. Zastosowano okno Nuttalla
 Fig.5. Periodogram of vibration of an efficient and an inefficient engine, Nuttall's window has been used

7. Wnioski

1. Wyniki przeprowadzonych badań przekroczyły oczekiwania autorów i wskazują na dużą wartość wykonanych pomiarów drgań. Jednoznaczne wyniki badań w znacznej mierze zależą od obiektu, którym w tym wypadku był charakterystyczny silnik o zapłonie samoczynnym, w którym wykorzystuje się wysokociśnieniową metodę wtrysku paliwa w systemie pompowtryskiwaczy.
2. Rysunek nr 1 pozwala na zdefiniowanie tezy, że drgania, mierzone na obudowie głowicy umożliwiają bezpośrednią diagnostykę pompowtryskiwaczy. Odłączenie jednego z pompowtryskiwaczy powoduje zanik charakterystycznych częstotliwości (rysunek nr 2). Można także zauważyć, że pracujące pompowtryskiwacze drgają z charakterystyczną częstotliwością, związaną z sekwencyjnością procesu wtrysku paliwa. Odłączenie któregoś z pompowtryskiwaczy powoduje zanik tej częstotliwości na periodogramie (rysunek nr 3 i 5); dla trzeciego pompowtryskiwacza jest to częstotliwość około 4,2kHz.
3. Zastosowanie szybkiej transformaty Fouriera, jako narzędzia do przejścia w dziedzinę częstotliwości, przy tego rodzaju sygnale wibracyjnym jest właściwym wyborem. Przy jednoznacznych zmianach w widmie, zastosowanie bardziej skomplikowanych transformat nie jest konieczne. Koniecznym natomiast staje się zastosowanie analizy krótkoczasowej, która umożliwi badanie tylko wybranych, charakterystycznych części widma.
4. Kształt okien wpływa na właściwości przeprowadzonej analizy. Każda kolejna próbka okna jest wymnażana z właściwą próbką sygnału badanego. W tym wypadku wybrano trzy okna, aby stwierdzić ich przydatność w analizie wibracyjnej. Różnica pomiędzy oknami wynika przede wszystkim z kształtu funkcji okna; szerokości i wartości listka głównego i listków bocznych. Zauważalny jest wpływ kształtu okna na uzyskany periodogram. Zasadność używania okien czasowych jest duża tylko wtedy, gdy różnice drgań są małe; wtedy istnieje możliwość wzmocnienia sygnału wykazującego istnienie pewnych charakterystycznych częstotliwości przy jednoczesnym tłumieniu składowych niepożądanych.
5. Umiejscowienie czujnika ma fundamentalne znaczenie dla wykonywanego pomiaru i analizy. Istnieje możliwość określenia pewnych uniwersalnych miejsc, w których drgania będą wprost wskazywać na uszkodzenie, a nawet je przewidywać (przez wzrost tłumienia pewnych częstotliwości). Dodatkowo zastosowanie analizy krótkoczasowej i okien, umożliwi selektywizację sygnału, aby stał się on pomocny w wibracyjnej diagnostyce silnika spalinowego.

Literatura

- [1] <http://micro.magnet.fsu.edu/micro/gallery/chips/chipshots.html>.
- [2] Stranneby, D., *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Metody, algorytmy, zastosowanie*, Wydawnictwo BTC, Warszawa 2004.
- [3] Doliński, J., *AVR w praktyce*, Wydawnictwo BTC, Warszawa 2003.
- [4] <http://www.automotoserwis.com.pl/porad/diesel.htm>.
- [5] http://www.statsoft.pl/textbook/glosfra_stat.html.
- [6] Zieliński, T. P., *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów*, Wydawnictwo WKŁ, Warszawa 2005.
- [7] Mandler, W. F. Jr., Yonushonis, T. M., *Application of ceramics to high pressure fuel systems*, ENCERATEC, Inc. Cummins, Inc.