

MASKING MECHANICAL DAMAGES IN THE MODERN CONTROL SYSTEMS OF COMBUSTION ENGINES

Zbigniew Dąbrowski

*Warsaw University of Technology
Faculty of Automobiles and Heavy Machinery Engineering
Institute of Machine Design Fundamentals
ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, Poland
tel.: +48 22 6608276, fax: +48 22 6608622
e-mail: zdabrow@simr.edu.pl*

Henryk Madej

*Silesian University of Technology, Faculty of Transport
Department of Automotive Vehicle Construction
ul. Krasynskiego 8, 40-019 Katowice, Poland
tel./fax +48 32 6034108
e-mail: henryk.madej@polsl.pl*

Abstract

We have to admit that the modern car engine is now a device of much higher level of reliability than it used to be some years ago, while the microprocessor-based steering system, supported by the board diagnostic equipment makes this reliability even higher. However, it doesn't mean that mechanical failures provoked by manufacturing errors, operation of the device, its exploitation or premature wearing cannot appear at all. Nor it means that the failures will be always recognized by diagnostic equipment. The OBD systems were actually created for environmental purposes and their development to the form that could guarantee proper diagnosing in the case of typical mechanical failures is currently a subject of many studies. However, the main topic of the paper does not consist in listing the cases of difficult or unidentifiable faults but in showing that there is a group of failures (mainly of mechanical type) that stimulate the developed steering system to regulate and weaken typical exterior symptoms, and subsequently to make the damage in certain propagation range unidentifiable even for an experienced mechanic. Therefore, the main objective of the paper consists in answering the question about the direction of the development of diagnostic systems, and suggesting some additional symptoms that could be taken into account, as well as the way they should be analyzed in order to minimize possibility of such occurrences.

Keywords: *combustion engines, masking mechanical damages, diagnostic systems*

MASKOWANIE USZKODZEŃ MECHANICZNYCH PRZEZ NOWOCZESNE SYSTEMY STEROWANIA SILNIKÓW SPALINOWYCH

Streszczenie

Nie można zaprzeczyć, że nowoczesny samochodowy silnik spalinowy jest urządzeniem o znacznie wyższej niezawodności niż przed laty, a mikroprocesorowy układ sterowania, wsparty pokładowym systemem diagnostycznym, jeszcze tę niezawodność zwiększa. Nie oznacza to jednak, że usterki mechaniczne, wywołane błędami wykonania, obsługi, eksploatacji czy przedwczesnym zużyciem, nie mogą wystąpić w ogóle. Nie oznacza to również, że w każdym przypadku usterki takie zostaną przez urządzenia diagnozujące rozpoznane. Systemy OBD powstały w końcu dla potrzeb ochrony środowiska, a rozbudowa ich do postaci gwarantującej postawienie właściwej diagnozy w przypadku typowo mechanicznej awarii jest obecnie przedmiotem licznych badań. Głównym problemem poruszonym przez autorów w proponowanym referacie nie jest jednak zestawienie przypadków trudnych lub niemożliwych do

rozpoznania niesprawności lecz wykazanie, że istnieje grupa uszkodzeń (głównie mechanicznych), przy których rozbudowany system sterowania dokona regulacji „osłabiającej” typowe objawy zewnętrzne, a tym samym uczyni uszkodzenie w pewnym zakresie propagacji nierozpoznawalnym nawet dla doświadczonego mechanika. Podstawowym zadaniem, które postawili sobie autorzy jest zatem odpowiedź na pytanie w jakim kierunku winien pójść rozwój systemów diagnostycznych tzn. jakie dodatkowe symptomy uwzględnić i jak je analizować by zminimalizować prawdopodobieństwo wystąpienia takiego rodzaju przypadków.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, maskowanie uszkodzeń mechanicznych, systemy diagnostyczne

1. Wstęp

Głównym celem współczesnych pokładowych systemów diagnostycznych nadzorujących pracę elektronicznych systemów sterowania jest przede wszystkim kontrola pracy silnika pod kątem spełnienia wymagań ekologicznych. Jest to monitorowanie pracy katalizatora oraz układu zapłonowego. Obszar tych działań nie jest wystarczający dla wykrywania uszkodzeń silnika powstających w trakcie eksploatacji. Przyjmowane granice dopuszczalnych zakresów zmienności sygnałów w systemach diagnostyki pokładowej są przyczyną ukrywania usterek mechanicznych, które w fazie powstawania nie są widoczne dla systemu.

Współczesne adaptacyjne systemy sterowania mogą, zatem maskować pewne uszkodzenia mechaniczne, których propagacja jest niebezpieczna dla konstrukcji. W szczególności należy uwzględnić tu rozsynchronizowanie faz rozrządu (problem dotyczy zarówno silników z zapłonem iskrowym jak i samoczynnym). Autorom znane są przypadki występowania tego rodzaju uszkodzeń, których niemożliwość wykrycia doprowadziła do poważnych uszkodzeń silnika. Problem ten jest szerszy i dotyczy zarówno stacjonarnych jak i trakcyjnych silników spalinowych.

Wiedza o tym zjawisku wyznacza dwa najbardziej istotne kierunki działań zmierzające do zwiększenia skuteczności systemów diagnozowania. Jednym z kierunków jest opracowanie nowych konstrukcji czujników i przetworników oraz układów przetwarzania generowanych przez nie sygnałów w celu zapewnienia jak najkrótszego czasu reakcji na dynamiczne zmiany sygnałów wejściowych. Innym kierunkiem badań jest określenie tych uszkodzeń silnika, których wykrycie przez system diagnostyki pokładowej jest utrudnione lub niemożliwe.

Badania wstępne zrealizowane przez Autorów wskazują na celowość podjęcia prac w zakresie ustalenia grup uszkodzeń mechanicznych silnika, które w swym początkowym stadium nie są wykrywane przez pokładowe systemy diagnostyczne.

2. Przykłady błędnych działań diagnostycznych

Nie można zaprzeczyć, że wdrożenie kontroli pracy silnika spowodowało zmianę charakteru pracy współczesnych stacji naprawy i diagnostyki samochodów, w znaczny sposób ograniczając wiedzę i umiejętności mechaników wyszkolonych w bardzo wąskim zakresie obsługi aparatury diagnostycznej. Jak wspomniano słabość adaptacyjnych układów autodiagnostyki ujawnia się w zakresie drobnych uszkodzeń mechanicznych, takich jak na przykład zarysowanie gładzi cylindra, czy nieodpowiednie ułożenie zaworu(-ów), które są w sposób niezauważalny zarówno dla użytkownika, jak i mechanika korygowane przez układ sterowania silnikiem. Zmiana warunków pracy silnika, która wystąpi w przypadku tego typu uszkodzeń zostanie zarejestrowana przez elektroniczne urządzenie sterujące, ale nie jako awaria, lecz zmiana parametrów regulacyjnych silnika, czyli zmieniona zostanie w takim przypadku dawka paliwa, czas jego wtrysku lub kąt wyprzedzenia zapłonu, czego miarą może być na przykład większe zużycie paliwa. Z punktu widzenia producenta nie stanowi to większego problemu, gdyż przypadki takie zdarzają się rzadko i w skali globalnej nie mają dla niego znaczenia, natomiast dla indywidualnego odbiorcy fakt zużywania przez jego samochód większej ilości paliwa i brak możliwości wykrycia usterki, która to spowodowała jest na pewno istotny.

To maskowanie uszkodzeń mechanicznych przez zewnętrzny układ regulacji nadaje znaczenia badaniom diagnostycznym, a w szczególności już od dawna wykorzystywanym metodom drganiowo-hałasowym tym bardziej, że również w tej dziedzinie nastąpił ogromny rozwój i zwiększenie możliwości urządzeń analizy cyfrowej. Badania diagnostyczne umożliwiają znaczne skrócenie czasu i obniżenie kosztów, dzięki wyeliminowaniu pracochłonnych czynności rozbiórki i składania sprawdzanych zespołów. Oszczędza się również w znacznym stopniu poddawane badaniom zespoły, gdyż przy zastosowaniu metod bezpośrednich po rozbiórce i złożeniu zużycie współpracujących części, wskutek konieczności nowego dotarcia się, następuje znacznie szybciej niż przed badaniem. Świadczy to wyraźnie o wyższości i celowości stosowania nieinwazyjnych metod diagnostycznych, polegających na obserwacji i pomiarach pośrednich.

Niezmiernie trudno jest opracować pełną statystykę uszkodzeń prawidłowo i nieprawidłowo diagnozowanych przez systemy pokładowe ze względu na konsekwentne utajnianie błędów popełnionych zarówno przez stacje obsługi jak i producentów. Pewne wyobrażenie o problemie może dać tabela 1, w której przedstawiono przykłady uszkodzeń błędnie zinterpretowanych lub niezauważonych przez systemy diagnostyczne, które zamontowano w pierwszym półroczu 2006 roku w wybranych punktach ASO Warszawy i Katowic, przy czym dane te przekazano Autorom pod warunkiem niepodawania szczegółów (typ silnika, marka, stacja ASO).

Tab. 1. Przykładowe usterki silników samochodowych, w których system diagnostyczny postawił błędną diagnozę lub zamaskował uszkodzenie zmieniając parametry pracy (dane publikowane za zgodą stacji obsługi z 1 półrocza 2006r.)
 Tab.1 Examples of car engines faults non identified by diagnostic system or masked by control system (1÷6.2006)

Silnik	Objawy zewnętrzne	Diagnoza	Rzeczywista przyczyna
		Działanie systemu sterowania	
ZS Common Rail (Opel Z17DTH)	– spadek mocy, – zwiększone zużycie paliwa, – trudności rozruchowe	brak – zmiana kąta wyprzedzenia wtrysku	Zapieczone pierścienie tłokowe na skutek złej pracy wtryskiwacza
ZS ^{*)}	– nieprawidłowa praca na biegu jałowym, – utrata mocy	– błąd systemu sterowania silnika lub wtryskiwacza brak	Nieprawidłowy przepływ we wtryskiwaczu (brak regulacji)
ZI ^{*)}	– zapalenie lampki MIL, – problemy z uruchamianiem	– błąd czujnika położenia wału korbowego, – błąd czujnika położenia wału rozrządu – regulacja kątów wyprzedzenia wtrysku i zapłonu	Zużyty (wyciągnięty) łańcuch mechanizmu rozrządu
ZI ^{*)}	– zapalenie lampki MIL,	– <i>błąd czujnika położenia wału korbowego</i> brak	Zanieczyszczenie wieńca koła zamachowego (wyciek oleju)

ZI wiele marek (Opel, Nissan, Renault itp.)	– falująca prędkość obrotowa biegu jałowego, – utrudniony rozruch, – gaśnięcie silnika	brak	Blokujące się na skutek zabrudzenia elementy przepustnicy
		– regulacja kąta wyprzedzenia zapłonu i wtrysku	
ZS ^{*)}	– utrudniony rozruch – zwiększenie zużycia paliwa, – pogorszenie osiągnięć silnika	brak	Wzrost rezystancji czujnika temperatury silnika
		– wydłużenie czasu wtrysku (niewielkie) – zwiększenie kąta wyprzedzenia wtrysku	
ZI Mazda	– zbyt niska i falująca prędkość obrotowa biegu jałowego, – zwiększone (nieznacznie) zużycie paliwa	brak	Nieszczelny zawór wylotowy
		– regulacja kąta wyprzedzenia zapłonu i wtrysku	
ZI Opel	lampa MIL nie świeci	– kod usterki (P0520) obwodu ciśnienia oleju silnika	Błąd w logice systemu diagnozującego
		brak	
ZI ^{*)} Opel	– zapalenie lampki MIL,	– kod usterki (P0335) błąd obwodu czujnika położenia wału korbowego	błąd oprogramowania systemu, zbyt wysoka czułość określenia pozycji wału korbowego
		brak	
ZI ^{*)}	– utrudniony rozruch, – pogorszenie osiągnięć silnika, – nierównomierna praca, – zwiększone zużycie paliwa	brak	Uszkodzona wiązka przewodów przepływomierza powietrza (brak masy)
		– regulacja kąta wyprzedzenia zapłonu i wtrysku	
^{*)} Dane szczegółowe zastrzeżone przez stację obsługi jako poufne.			

Mimo takich ograniczeń w tabeli widać wyraźnie, że pewne grupy uszkodzeń mechanicznych są nie diagnozowalne przez system. W niektórych przypadkach układ sterowania wyraźnie maskuje usterkę przez zmianę parametrów pracy prowadząc w efekcie do swobodnej propagacji uszkodzenia. Oczywiście istnieją symptomy pozwalające na rozpoznanie takiego uszkodzenia, lecz są one nie obserwowane (np. ciśnienie sprężania). Czy warto zatem rozbudowywać istniejące systemy diagnostyczne wprowadzając dodatkowe percepcje?

3. Problem celowości stosowania symptomów wibroakustycznych

Dynamiczny rozwój cyfrowych metod analizy sygnałów nasuwa wniosek, że cennym uzupełnieniem układów diagnostycznych mogłyby być symptomy W-A. Rozważania nad problemem użyteczności, opłacalności stosowania miar drganiowo hałasowych rozpoczniemy od przedstawienia wyników eksperymentu przeprowadzonego przez Autorów.

Celem badań była próba identyfikacji dróg propagacji sygnału wibroakustycznego w czterosuwowym, dwucylindrowym silniku spalinowym. Dodatkowo w eksperymencie wykorzystano pomiary sygnału drganiowego do oceny stanu technicznego badanego silnika, w którym sztucznie zasymulowano niesprawności. Ze względu na to, że poszukiwane były zakłócenia pracy silnika związane z układem rozrządu, tłumieniem wylotu spalin i zakłóceniami cyklu spalania, pomiarów drgań dokonano na głowicy silnika.

Przeprowadzony został czynny eksperyment na obiekcie rzeczywistym, który stanowił silnik samochodu Fiat 126p, potraktowany w tym przypadku jako obiekt przykładowy, a wybrany celowo ze względu na dodatkowe utrudnienie, jakie stanowi brak przesunięcia fazowego ruchu tłoków w obu cylindrach. Skuteczna identyfikacja źródła drgań w takim przypadku pozwala na łatwość adaptacji uzyskanych wyników do zespołów napędowych o bardziej skomplikowanej budowie.

Pomiary wykonane zostały przy użyciu zestawu aparatury pomiarowej zawierającego dwa akcelerometry B&K typ 4384, wzmacniacz pomiarowy B&K typ 2692A Nexus, magnetofon cyfrowy (DAT) TEAC typ RD-135T i cyfrowy czujnik prędkości obrotowej silnika.

Akcelerometry zamontowane zostały na śrubach mocujących głowicę cylindrów silnika symetrycznie względem płaszczyzny poprzecznej silnika w celu rejestracji drgań obu cylindrów w jednakowych warunkach oraz możliwości rozróżnienia cylindra, w którym występuje uszkodzenie w związku z różnymi drogami propagacji drgań. Poza tym jako trzeci kanał rejestrowany był sygnał z cyfrowego obrotomierza zainstalowanego dodatkowo, aby łatwo było ustalić prędkość obrotową silnika dla każdego pomiaru oraz na otrzymanych później z zarejestrowanych przebiegów czasowych widmach przyspieszeń drgań łatwo było tę prędkość zidentyfikować.

Wykonany został cykl badań, który obejmował następujące próby:

- praca silnika w pełni sprawnego (dokładna regulacja luzu zaworów, przerwy pomiędzy elektrodami świecy, itp.),
- brak zapłonu w pierwszym cylindrze (brak iskry na świecy zapłonowej),
- brak zapłonu w drugim cylindrze (brak iskry na świecy zapłonowej),
- zwiększona do 0,3 mm wartość luzu na zaworze dolotowym pierwszego cylindra (wartość nominalna 0,2 mm),
- zwiększona do 0,3 mm wartość luzu na zaworze dolotowym drugiego cylindra (wartość nominalna 0,2 mm),
- oba cylindry rozregulowane w wyżej wymieniony sposób,
- zdławiony wylot spalin z pierwszego cylindra,
- zdławiony wylot spalin z drugiego cylindra,
- zdławiony wylot spalin z obu cylindrów.

Dławienie wylotu spalin zrealizowane zostało przez zainstalowanie pomiędzy kolektorami wylotowymi a rurami tłumika stalowego elementu z otworem o średnicy \varnothing 14 mm (średnica nominalna kolektora wylotowego \varnothing 29 mm).

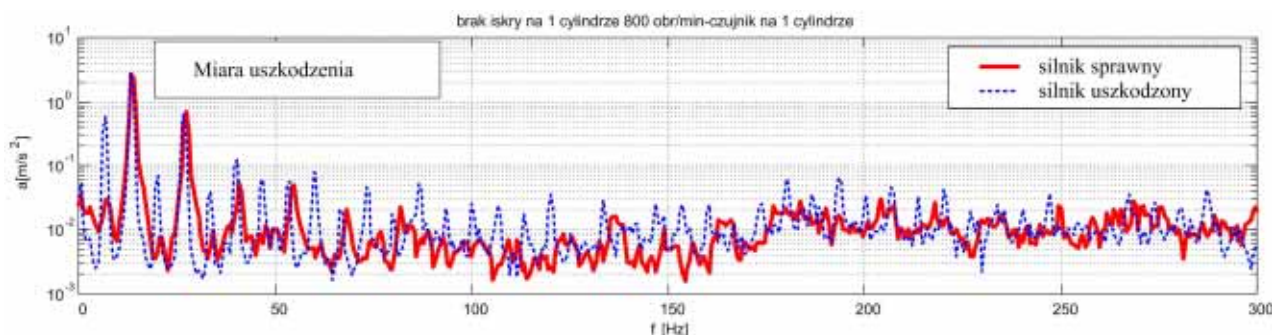
Zarejestrowane wyniki poddano prostej transformacji Fouriera (FFT).

Zgodnie z oczekiwaniami najlepiej widocznym z zasymulowanych uszkodzeń jest brak zapłonu w jednym z cylindrów. W przypadku wystąpienia takiej niesprawności na widmie widoczne są składowe harmoniczne odpowiadające podstawowej częstości zapłonu, ale poza nimi generowane są składowe odpowiadające „wypadaniu” zapłonu. Efekt ten jest bardzo dobrze widoczny niezależnie od prędkości obrotowej silnika. Następuje również podniesienie ogólnego poziomu przyspieszeń drgań głowicy.

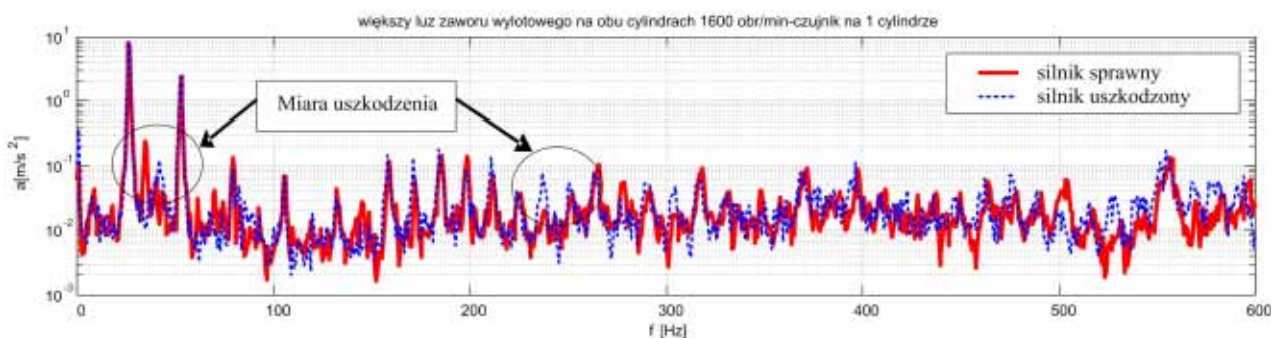
Rozregulowanie zaworu wylotowego jest trudniejsze do wykrycia metodą prostej analizy widmowej, ale również zauważalny. Przy wszystkich prędkościach obrotowych silnika występują w tym przypadku zaburzenia składowych harmonicznych częstości spalania i związane z tym zmiany ich amplitud.

Ostatnią z przeprowadzonych prób było stłumienie wylotu spalin z poszczególnych cylindrów lub obu jednocześnie. W związku z tym, że również ta usterka związana jest z przebiegiem spalania, także w tym przypadku widoczne są efekty jego zakłócenia podobnie jak dla złej regulacji luzu zaworów.

Przykładowe wyniki badań przedstawiono na poniższych rysunkach.



Rys. 1. Widmo przyspieszeń drgań głowicy. Rodzaj uszkodzenia – brak zapłonu w jednym z cylindrów – 800 obr/min.
Fig. 1. Acceleration spectrum of head vibration.

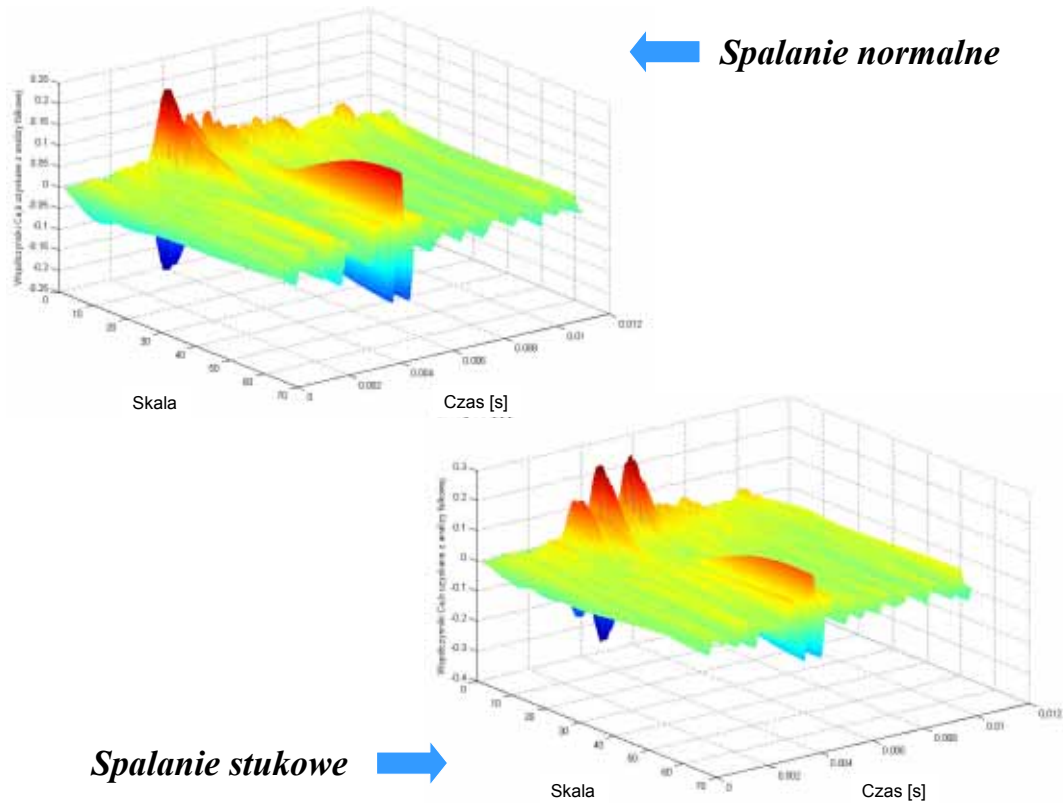


Rys. 2. Widma przyspieszeń drgań głowicy. Rodzaj uszkodzenia – większy luz zaworu wylotowego – 1600 obr/min.
Fig. 2. Acceleration spectrum of head vibration. Correct and incorrect valve backleash.

Jak wspomniano głównym celem badań była próba odpowiedzi na pytanie, czy na podstawie tak przeprowadzonych pomiarów i analizy częstotliwościowej można stwierdzić, w którym z cylindrów występuje uszkodzenie, a więc jaka jest droga propagacji drgań w badanym silniku. Dominujący na widmach przyspieszeń drgań wpływ zapłonu i prędkości obrotowej silnika do częstotliwości około 150 Hz dla prędkości obrotowej 800 Hz powoduje, że jakiegokolwiek różnice uwidaczniają się dopiero po przekroczeniu tej wartości. Separacja sygnałów z dwóch źródeł, które w tym przypadku stanowią cylindry badanego silnika, wymaga zastosowania dokładniejszych algorytmów analizy sygnałów, takich jak metody oparte na sztucznych sieciach neuronowych, czy też metody widmowe wykorzystujące funkcje koherencji, a zwłaszcza metody analizy czasowo-częstotliwościowej (transformata falkowa).

Widoczne na widmach przyspieszeń drgań różnice były jednak na tyle duże i powtarzalne, że sądzić należy, iż można znaleźć jednoznaczną miarę drganiową wskazującą, w którym cylindrze nastąpiło uszkodzenie.

Zdaniem Autorów dalsze wyselekcjonowanie miar widmowych jest niecelowe gdyż pełniejsze odzwierciedlenie pracy silnika spalinowego oraz jego diagnozowanie umożliwiają łączne czasowo-częstotliwościowe reprezentacje sygnałów. Dokładna amplitudowo-częstotliwościowa dekompozycja sygnału złożonego w funkcji czasu umożliwia przedstawienie zmienności amplitud, częstotliwości i faz chwilowych jego sygnałów składowych.



Rys. 3. Wyniki analizy falkowej sygnału przyspieszeń drgań przy spalaniu normalnym i stukowym.
 Fig 3. Wavelet transform of vibration acceleration in the case of normal and knocking combustion.

Jedną z metod selekcji czasowo-widmowej jest powszechnie stosowana transformata falkowa (WT). Można ją przyrównać do filtracji o stałej względnej szerokości pasma. W analizie falkowej pozycja filtra na mapie czasowo-częstotliwościowej jest określana przez parametry skali i przesunięcia. Wraz z przesuwaniem się okna w stronę wyższych częstotliwości, wzrasta szerokość pasma analizy i zmniejsza się tym samym rozdzielczość w dziedzinie częstotliwości, natomiast rośnie rozdzielczość w dziedzinie czasu i na odwrót. Ta cecha analizy falkowej jest przydatna w przypadku jednoczesnej analizy szybkozmiennych procesów wysokoczęstotliwościowych i wolnozmiennych procesów niskoczęstotliwościowych generowanych przez silnik spalinowy.

Rysunek 3 przedstawia wyniki analizy falkowej przyspieszeń drgań korpusu zarejestrowanych przy spalaniu normalnym i stukowym. Czytelność i łatwość interpretacji tego zapisu pozwala na łatwe i powtarzalne diagnozowanie szczegółowe.

Wniosek

Przeprowadzone badania potwierdzają tezę, iż możliwe i celowe jest uzupełnienie pokładowych systemów diagnostycznych systemem analizującym drgania mechaniczne silnika (głowicy) właściwie dobrane metody analizy sygnałów mogą wspomóc system na tyle, by jednoznacznie na tyle zinterpretować usterki mechaniczne maskowane przez układ regulacji silnika. Autorzy rozpoczęli szeroki program badawczy zmierzający do udzielenia jednoznacznej odpowiedzi na postawione pytania.

Pracę wykonano w ramach projektu finansowanego przez MNiI w latach 2005-2008.

Literatura

- [1] Flekiewicz, M., Madej, H., *Ocena procesu spalania w silnikach spalinowych metodami wibroakustycznymi*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Transport z.48, 2003.
- [2] Dąbrowski, Z., Kurkiewicz, M., *Próba identyfikacji dróg propagacji sygnału wibroakustycznego w dwucylindrowym silniku spalinowym*, Materiały XXIX Ogólnopolskiego Sympozjum DIAGNOSTYKA MASZYN, Węgierska Górka 2002.
- [3] Merkisz, J., Mazurek, St., *Pokładowe systemy diagnostyczne pojazdów samochodowych*, WKŁ, Warszawa 2004,
- [4] Geng, Z., Chen, J., *Investigation into piston-slap-induced vibration for engine condition simulation and monitoring*, Journal of Sound and Vibration 282 (2005) pp. 735÷751.
- [5] Stankowić, L.J., Böhme, J.F., *Time-frequency analysis of multiple resonances in combustion engine signals*, Signal Processing (1999), pp.15÷28.
- [6] Isermann, R., *Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications*, Annual Reviews in Control 29 (2005), pp. 78÷85.