

Piotr BOGUŚ  
Rafał GRZESZCZYK  
Adam WRONA  
Mateusz DEDO  
Jarosław MARKOWSKI  
Jerzy MERKISZ  
Marek WALIGÓRSKI

PTNSS–2015–3397

## The possibility of applying wavelet analysis for diagnostics of the validity of injection process of diesel engine fuel injector based on selected parameters of the reactive cylinder vibration process

*This work concerns the possibility of diagnosing the technical fitness of the diesel engine fuel injector, at the basis of which is a more accurate assessment of changes in operating characteristics of the injector and validity of fuel injection process. Failure ratings of this strategic element of the engine supply system is important both from the point of view of the accuracy of work processes carried out in the engine, evaluation of the efficiency of individual components and assemblies over the life of a technical object (also compatible with current and future requirements for on-board diagnostics OBD) and safety of tasks performed by the vehicle in specific road conditions. It is therefore important to search for increasingly accurate and comprehensive diagnostic tools for the evaluation of engine components. The analysis presented in frequency and time domains using a wavelet transformation DWT allowed for the evaluation of the signal properties and isolating the structural elements of the fuel injection process carried out on the developed and constructed test bench for different variables of the injection process. With this analysis, it was possible to build a functional relation between the parameters of the fuel injection and its technical performance and the estimates of the vibro-acoustic process in the time and frequency domains by DWT analysis.*

Key words: *diagnostics, vibration signal, fuel injection, wavelet analysis*

### Możliwości zastosowania analizy falkowej do diagnostyki poprawności procesu wtrysku paliwa z wtryskiwacza silnika ZS w oparciu o wybrane parametry procesu drganiowego tulei reakcyjnej

*Niniejsza praca dotyczy możliwości diagnozowania podatności technicznej, wtryskiwacza silnika ZS, u podstaw której jest coraz dokładniejsza ocena zmian charakterystyk eksploatacyjnych wtryskiwacza i poprawności procesu wtrysku paliwa. Ocena niesprawności tego strategicznego elementu układu zasilania silnika jest istotna zarówno z punktu widzenia poprawności procesów roboczych realizowanych w silniku, oceny sprawności poszczególnych elementów i podzespołów w całym okresie eksploatacji obiektu technicznego (również zgodnego z obecnymi i przyszłymi wymaganiami dla diagnostyki pokładowej OBD), jak i bezpieczeństwa realizowanych zadań przez dany pojazd dla konkretnych warunków drogowych. Stąd tak ważne jest poszukiwanie narzędzi coraz dokładniejszej i pełnej oceny diagnostycznej elementów silników. Prezentowana analiza w dziedzinie czasu i częstotliwości z zastosowaniem transformacji falkowej DWT umożliwiła ocenę własności sygnału i wyodrębnienia ich elementów strukturalnych dla procesu wtrysku paliwa realizowanego na opracowanym i zbudowanym stanowisku badawczym dla różnych zmiennych procesu wtrysku. Dzięki tej analizie możliwe było zbudowanie zależności funkcyjnych między parametrami procesu wtrysku paliwa i jego sprawności technicznej a estymatami procesu wibroakustycznego w dziedzinie czasu i częstotliwości przy zastosowaniu analizy DWT.*

Słowa kluczowe: *diagnostyka, sygnał drganiowy, wtrysk paliwa, analiza falkowa*

#### 1. Wprowadzenie

Części składowe układów zasilania silnika o załpnie samoczynnym należą do jednych z jego najwrażliwszych elementów. Szczególnie na uszkodzenie są narażone pary precyzyjne, czyli sekcja tłocząca pompy i rozpylacz. Z racji pełnionych funkcji w układzie zasilania szczególnie waż-

nym jest rozpylacz. Od jego sprawności zależy przebieg procesu spalania paliwa dostarczanego do cylindra. Pogorszenie właściwości rozpylacza pogarsza proces spalania, a przez to powoduje pogorszenie parametrów eksploatacyjnych i ekologicznych silnika. Jednocześnie zmniejsza sprawność ogólną silnika oraz powoduje wzrost emisji szkodliwych składników spalin [1-4]. Problemy eksplo-

atacyjne i ekologiczne silników spali-nowych wynikać mogą z wielu przyczyn. Dlatego duże znaczenie ma precyzyjna diagnostyka silnika. Do tej pory nierozwiązany jest problem dokładnej i jednoznacznej diagnostyki rozpylacza. Istnieją natomiast metody oceny jego działania polegające na optycznej obserwacji strugi paliwa. Są to metody subiektywne i uzależnione od osoby dokonującej obserwacji. Powszechnie stosowaną metodą oceny wtryskiwaczy w warunkach warsztatowych jest tzw. metoda przelewowa. Polega ona na miareczkowaniu paliwa wypływającego z otworków rozpylających oraz z otworu przelewowego wtryskiwacza. Zwiększenie ilości paliwa wypływającej z otworu przelewowego świadczy o nadmiernym luzie w parze precyzyjnej rozpylacza i pogorszeniu parametrów przepływowych przez otwórki rozpylające rozpylacza. Wadą metody jest brak informacji o rozkładzie przestrzennym strugi w cylindrze, która jest istotna dla uzyskania pełnej informacji o stanie wtryskiwacza. Wykorzystanie metody optycznej umożliwia ocenę obrazów rozpylonej strugi paliwa z wykorzystaniem narzędzi numerycznych do analizy obrazów rozprzestrzeniającej się strugi w przestrzeni. Wysokie koszty zakupu aparatury badawczej i specjalistyczna obsługa, powodują, że metoda ta jest wykorzystywana w specjalistycznych laboratoriach badawczych i nie nadaje się do zastosowań warsztatowych.

Autorzy artykułu podjęli próbę rozwiązania tego problemu przez opracowanie metody diagnozowania rozpylacza na podstawie rozpylenia strugi paliwa z wykorzystaniem efektów wibroakustycznych towarzyszących procesowi wtrysku. Istotą postawionego problemu jest wykorzystanie wartości parametrów wibroakustycznych, mających źródło w procesie wtrysku, do opisu i diagnozowania rozpylenia strugi paliwa [3]. Przeprowadzono szereg prób i analiz ukierunkowanych na identyfikację zależności procesowych uzyskiwanych drgań tulei w skutek wtrysku paliwa. Jednym z nich było oszacowanie wpływu wartości ciśnienia paliwa zasilającego wtryskiwacz na zmianę wartości drgań tulei.

## 2. Koncepcja i metodyka badań

### 2.1. Koncepcja metody

Proces rozpylenia paliwa jest procesem dynamicznym. Przemieszczająca się w ośrodku struga charakteryzuje się prędkością rozprzestrzeniania, kątem stożka strugi, zasięgiem i objętością. Parametry te wykorzystuje się do makroskopowej oceny rozpylenia. Wzajemne relacje między tymi parametrami świadczą o dynamicznym charakterze rozprzestrzeniającej się strugi. Procesowi rozpylenia paliwa z wtryskiwaczy silników o ZS podczas wtrysku do przestrzeni otwartej towarzyszy efekt akustyczny, co potwierdza dynamiczny charakter procesu. Pomiar ciśnienia akustycznego z maszyn i

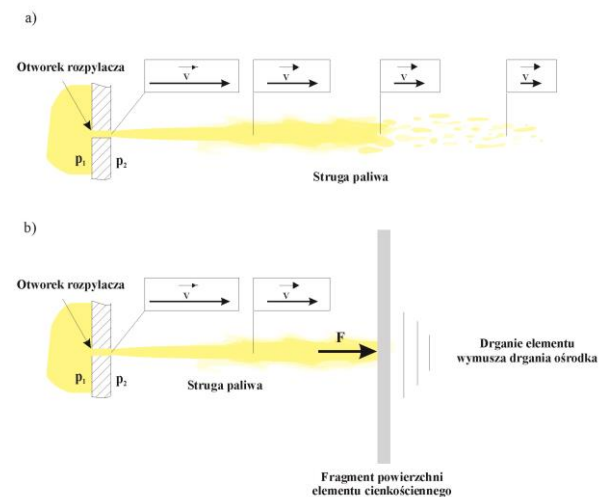
urządzeń zazwyczaj charakteryzuje się złożonością sygnału związaną z wieloma źródłami jego emisji. W związku z tym ocena rozpylenia paliwa na podstawie tego parametru może okazać się niewystarczająca. Z tego powodu postanowiono wykorzystać potencjał energetyczny rozprzestrzeniającej się strugi paliwa (rys. 1.a).

Rozpatrując cząstkowo strugę paliwa należy zauważyć, że masa paliwa przepływająca przez otwórki rozpylacza charakteryzuje się największą wartością prędkości wynikającą z zależności (1):

$$v_w \approx \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho_{\text{pal}}}} \quad (1)$$

gdzie:

- $v_w$  – prędkość wypływu paliwa [m/s],
- $p_1$  – ciśnienie paliwa przed otworkiem rozpylacza [Pa],
- $p_2$  – ciśnienie paliwa za otworkiem rozpylacza [Pa],
- $\rho_{\text{pal}}$  – gęstość paliwa [ $\text{kg/m}^3$ ].



Rys. 1. Koncepcja oceny procesu rozpylenia z wykorzystaniem zjawisk wibroakustycznych [3]:

a) dynamika strugi paliwa, b) idea koncepcji

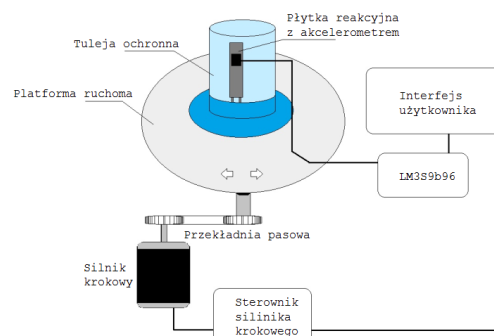
$v$  – prędkość chwilowa strugi paliwa,  $p_1$  – ciśnienie paliwa w rozpylaczu,  $p_2$  – ciśnienie otoczenia,  $F$  – siła wymuszająca

W miarę oddalenia się od otworka prędkość masy paliwa w rozprzestrzeniającej się strudze maleje, a zmiany te są uzależnione od rozpylenia i przeciwiśnienia ośrodka. Wraz z poprawą rozpylenia paliwa uzyskuje się mniejsze krople; mniejsza ich masa oznacza mniejszą wartość energii kinetycznej kropli, co skutkuje szybszą utratą prędkości kropli przemierzającej się w ośrodku. Jeśli na drodze rozprzestrzeniającej się strugi paliwa ustawić płaską przeszkodę (rys. 1), to można uzyskać efekt oddziaływania na nią rozprzestrzeniającej się strugi, będący skutkiem uderzenia przemierzającej się z pewną prędkością masy paliwa. Zgodnie z zasadą

zachowania pędu energia zawarta w kropli paliwa podczas uderzenia oddziałuje na powierzchnię przeszkody siłą, która może zostać wykorzystana jako wielkość wymuszająca procesy dynamiczne układu bryły sztywnej. Jeśli zastosuje się jako przeszkodę element cienkościenny, to zmiany spowodowane działaniem siły wymuszającej pochodzącej od rozprzestrzeniającej się strugi rozpylonego paliwa mogą spowodować drgania elementu. Wartości uzyskanych drgań elementu cienkościennego, będąc zależne od jakości rozpylenia strugi paliwa, mogą być wykorzystane do próby oceny jego rozpylenia. W związku z tym w Zakładzie Silników Spalinowych Politechniki Poznańskiej opracowano koncepcję oceny rozpylenia paliwa z wykorzystaniem sygnałów wibroakustycznych. Koncepcja ta zakłada, że zmiany energii kinetycznej rozprzestrzeniającej się strugi, w zależności od jakości rozpylenia będą na tyle istotne, że pozwolą na określenie zakresu wartości sygnałów wibroakustycznych pozwalających na weryfikację poprawności rozpylenia, a tym samym umożliwią ocenę zdolności wtryskiwacza do dalszej eksploatacji.

## 2.2. Metodyka badań

Celem przeprowadzonych prac jest ocena parametryczna sygnału drganiowego tulei reakcyjnej wywołanego rozpyloną strugą paliwa w aspekcie wykorzystania uzyskanych wyników do oceny zdolności wtryskiwacza z wykorzystaniem analizy falkowej. Przedstawiany zakres prac stanowi fragment badań i analiz zmierzających do określenia algorytmu systemowego oceny rozpylenia paliwa a w szczególności dotyczy wyznaczenia miar sygnału drganiowego, na podstawie którego będzie można określić zakres wartości świadczących o właściwej lub nie właściwej jakości rozpylenia paliwa. Obiektem prowadzonych badań były strugi rozpylonego paliwa uzyskane z wtryskiwaczy silnikowy o ZS. Wtryskiwacze były tego samego typu, zasilane tym samym paliwem, o takich samych parametrach wtrysku tj. ciśnieniem i czasem otwarcia wtryskiwacza (tab. 1). Część pomiarowa jest układem odpowiedzialnym za uzyskanie sygnału wibroakustycznego badanego wtryskiwacza. W trakcie prac zwrócono szczególną uwagę na odizolowanie mierzonego sygnału od zakłóceń zewnętrznych. Głównymi elementami części pomiarowej (rys. 2), są: akcelerometr piezoelektryczny, płytka reakcyjna, silnik krokowy, sterownik silnika krokowego, platforma ruchoma, tuleja zabezpieczająca. Elementem sterującym akwizycją danych pomiarowych oraz kontrolującym pracę sterownika silnika krokowego jest mikrokontroler LM3S9B96 umieszczony na specjalnie zaprojektowanej do tego zadania płycie sterującej. Pomiar sygnału drganiowego realizowano w osi Z – prostopadłej do powierzchni tulei. Podczas badań realizowano jeden wtrysk paliwa do komory reakcyjnej. pomiar powtarzano trzykrotnie.



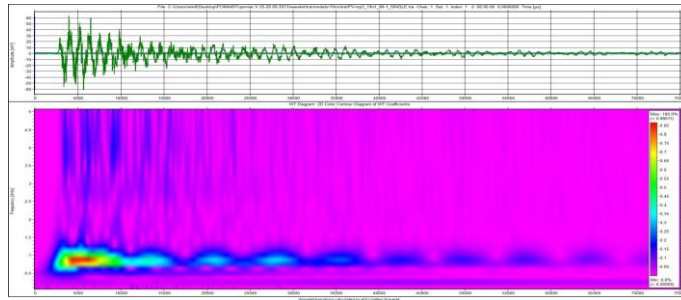
Rys. 2. Schemat ideowy części pomiarowej stanowiska

Tab. 1. Pomiar wtryskiwaczy z serii 19nx

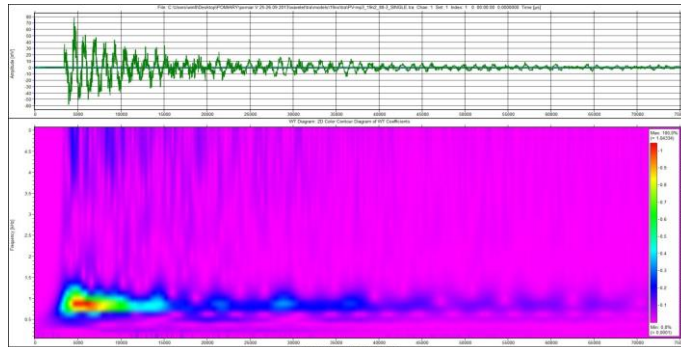
Wtryskiwacz	Ciśnienie w zasobniku [MPa]	Czas wtrysku [ms]
19n1	80	0,8
19n2		
19n3		
19n4		
19n5		

## 3. Wyniki pomiarów i ich analiza

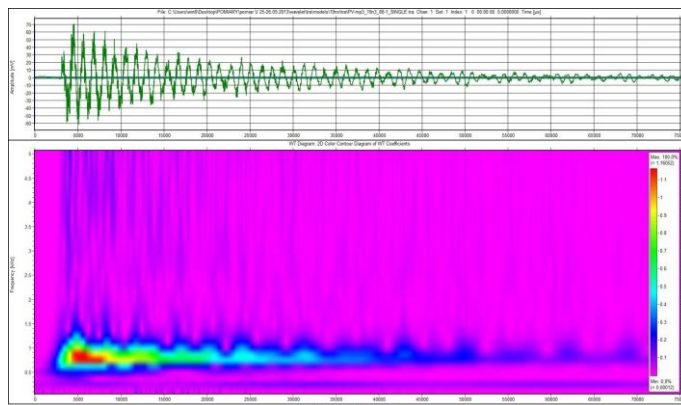
Uzyskane sygnały drganiowe zarejestrowane jako funkcje czasu poddano analizie falkowej. Przebiegi sygnału i wyniki analizy dla badanych wtryskiwaczy przedstawiono graficznie (rys. 3-7). Otrzymane wyniki, na podstawie transformaty falkowej, są uzupełnieniem wyników wcześniej prowadzonych analiz bazujących na widmie częstotliwościowym. Przedstawione na rysunkach charakterystyki przedstawiają bardzo zbliżone własności pomiędzy wtryskiwaczami tego samego modelu. Nawet najbardziej odległe w sensie wartości realizacji wtrysku dla wtryskiwaczy 19n1 i 19n3 wykazują podobieństwa. W analizie należy zwrócić uwagę na główne na powtarzalny czas występowania maksimum w charakterystykach oraz pasmo w jakim występuje badany sygnał. Zaobserwowane podobieństwa mogą świadczyć o możliwości błędnie wykonanego pomiaru dla części wtryskiwaczy (nie zachowanie stałych parametrów ciśnienia oraz czasu otwarcia wtryskiwacza). Obserwowany proces wtrysku paliwa jest rozróżnialny w paśmie 0,5–1,5 kHz, co znacznie ułatwia jego proces oceny diagnostycznej, w tym jego ekstrakcję z sygnału wyjściowego ujmującego więcej procesów dynamicznych zachodzących w obiekcie, a przenoszonych na jego strukturę. Zaprezentowane przebiegi uzyskane z transformacji falkowej wyraźnie wskazują na impulsowość powyższego procesu o niewielkim czasie jej ekspozycji, relatywnie stabilnym dla różnych egzemplarzy danego rodzaju wtryskiwacza. Różnice dotyczą obszarów o mniejszej intensywności emisji



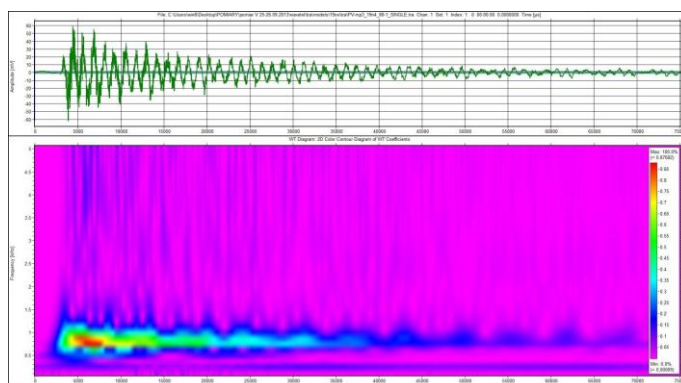
Rys. 3. Przebieg czasowy rejestrowanego sygnału drganiowego i jego transformata Falkowa dla wtrysku paliwa z wtryskiwacza 19n1 (mocowanie P3,  $p_w = 80\text{MPa}$ ,  $t_w = 0,8\text{ ms}$ , powtórzenie 1)



Rys. 4. Przebieg czasowy rejestrowanego sygnału drganiowego i jego transformata Falkowa dla wtrysku paliwa z wtryskiwacza 19n2 (mocowanie P3,  $p_w = 80\text{MPa}$ ,  $t_w = 0,8\text{ ms}$ , powtórzenie 1)

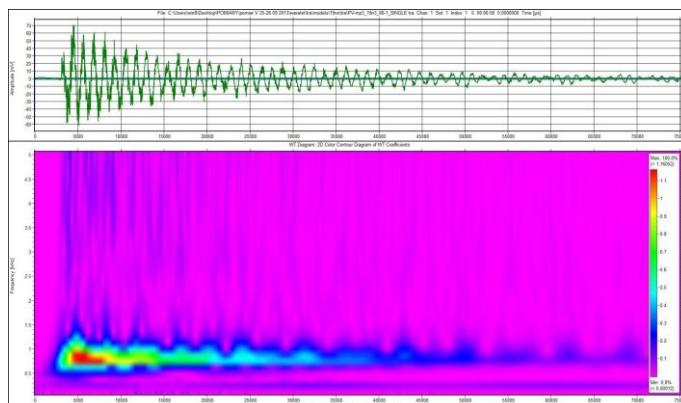


Rys. 5. Przebieg czasowy rejestrowanego sygnału drganiowego i jego transformata Falkowa dla wtrysku paliwa z wtryskiwacza 19n3 (mocowanie P3,  $p_w = 80\text{MPa}$ ,  $t_w = 0,8\text{ ms}$ , powtórzenie 1)



Rys. 6. Przebieg czasowy rejestrowanego sygnału drganiowego i jego transformata Falkowa dla wtrysku paliwa z wtryskiwacza 19n1 (mocowanie P3,  $p_w = 80\text{MPa}$ ,  $t_w = 0,8\text{ ms}$ , powtórzenie 1)



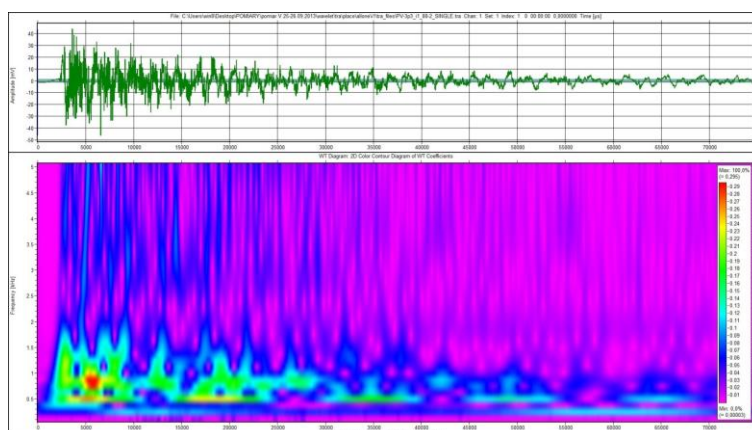


Rys. 7. Przebieg czasowy rejestrowanego sygnału drganiowego i jego transformata Falkowa dla wtrysku paliwa z wtryskiwacza 19n1 (mocowanie P3,  $p_w = 80\text{MPa}$ ,  $t_w = 0,8\text{ ms}$ , powtórzenie 1)

energii w procesie, ujętej w różnicy amplitudowej reprezentacji czasowej oraz stopnia tłumienia charakterystyki przyspieszeń drgań.

Graniczna wartość  $L_p = 18000$  oznacza górną granicę okna sygnału badanego dla rozważanego procesu. Dalsze tłumienie przebiega w każdym z rozpatrywanych wtryskiwaczy podobnie. Na podstawie uzyskanych wyników dostrzega się możliwość oceny różnic w reprezentacji energetycznej dla każdego z procesów wtrysku paliwa, co jest korzystne dla parametryzacji różnic w procesie wtrysku. Dla wtryskiwaczy tego samego typu oznacza to dokładniejszą ocenę sygnału drganiowego, a w konsekwencji parametryzacji jakości rozpylenia paliwa i właściwości eksploatacyjnej wtryskiwacza.

Przeprowadzone analizy dotyczyły powtarzalności uzyskiwanego sygnału drganiowego wymuszanego przy takich samych wartościach nastaw urządzeń sterujących i ciśnienia paliwa zasilającego wtryskiwacz oraz takiego samego czasu otwarcia wtryskiwacza w odniesieniu do nowych wtryskiwaczy tego samego typu. Dla podkreślenia znaczenia przeprowadzonych badań dokonano pomiarów sygnału drganiowego podczas wtrysku paliwa realizowanego wtryskiwaczem używanym. Przykładowy przebieg sygnału drganiowego uzyskanego podczas badań wtrysku z wtryskiwacza II oraz wyniki przeprowadzonej analizy sygnału przedstawiono graficznie (rys. 8). Wyniki z analizy falkowej uzyskanego sygnału wykazują pewne różnice.



Rys. 8. Przebieg czasowy rejestrowanego sygnału drganiowego i jego transformata Falkowa dla wtrysku paliwa z wtryskiwacza II (mocowanie P3,  $p_w = 80\text{MPa}$ ,  $t_w = 0,8\text{ ms}$ , powtórzenie 3)

Rozkład energii zawartej w sygnale drganiowym jest rozproszony w większym zakresie częstotliwościowym co przekłada się na mniejsze wartości energii skupionej w danym obszarze.

#### 4. Podsumowanie

Przeprowadzone analizy sygnału wskazują na przydatność analizy falkowej w ocenie sygnału

drganiowego wymuszanego rozpyloną strugą paliwa. Może być ona wykorzystana jako analiza uzupełniająca informacje uzyskane z analizy częstotliwościowej w algorytmie oceny jakości rozpylenia paliwa i zdatności wtryskiwacza. Przeprowadzone badania wykazują podobieństwa charakterystyki rozpylenia uzyskiwanego z wtryskiwaczy tego samego typu. Wskazują jednocześnie na konieczność standaryzacji parametrów zasilania wtryski-

wacza. Uzyskane wyniki potwierdzają przydatność metody wibroakustycznej do diagnozowania stanu wtryskiwacza. Przyszłość projektu przy pozytywnych wynikach metody może wpłynąć zasadniczo na sposób diagnozy wtryskiwaczy.

Artykuł powstał w wyniku realizacji projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, Umowa nr INNOTECH-K2/IN2/12/181861/NCBR/12.

## Skróty i oznaczenia

$p_w$  – ciśnienie paliwa na zasilaniu wtryskiwacza  
 $t_w$  – czas wtrysku  
 $v$  – prędkość chwilowa strugi paliwa  
 $p_1$  – ciśnienie paliwa w rozpylaczu  
 $p_2$  – ciśnienie otoczenia

$F$  – siła wymuszająca  
 $v_w$  – prędkość wypływu paliwa  
 $\rho_{pal}$  – gęstość paliwa

## Literatura

- [1] Boguś P., Merkisz J., Grzeszczyk, R., Mazurek, S., Nonlinear Analysis of Combustion Engine Vibroacoustic Signals for Misfire Detection, SAE Technical Paper 2003-01-0354, 2003.
- [2] Merkisz, J., Waligórski, M., Boguś P., Grzeszczyk R., Diagnostyka zjawiska wypadania zapłonów w silnikach lokomotyw spalinyowych. Pojazdy Szynowe, 2002, nr. 4., s. 30-40.
- [3] Merkisz J., Markowski J., Bajerlein M., Waligórski M., Mądry J., Ocena rozpylenia paliwa z wykorzystaniem procesów wibroakustycznych. IV Międzynarodowy Kongres Silników Spalinowych 16-17 czerwca 2011, Radom.
- [4] Merkisz J., Boguś P., Grzeszczyk R., Overview of engine misfire detection methods used in on board diagnostics. Journal of Kones. Combustion Engines, Vol 8, No 1-2, 2001.

Mr. Piotr Boguś, DSc., PhD, Eng. – Head of Department of Physics and Biophysics of Medical University of Gdańsk, Professor at Rail Vehicle Institute TABOR in Poznań  
Dr hab. inż. Piotr Boguś – Kierownik Katedry i Zakładu Fizyki i Biofizyki Gdańskiego Uniwersytetu Medycznego, profesor w Instytucie Pojazdów Szynowych TABOR w Poznaniu



Mr. Rafał Grzeszczyk, PhD, MSc, Eng. MBA – director of Automex sp. z o.o., Gdańsk  
Dr inż. Rafał Grzeszczyk – dyrektor Automex sp. z o.o., Gdańsk



Mr. Adam Wrona, DSc., Eng. – financial director of Automex Sp. z o.o. in Gdańsk  
Dr inż. Adam Wrona – zastępca dyrektora ds technicznych. Automex Sp. z o.o. w Gdańsku



Mr Mateusz Dedo, Eng – desinger/progammer of Automex sp. z o.o., Gdańsk  
Inż. Mateusz Dedo – konstruktor/programista Automex sp. z o.o., Gdańsk



Jarosław Markowski, DSc., DEng – doctor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.  
Dr hab. inż. Jarosław Markowski – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej



Jerzy Merkisz, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.  
Prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz – profesor na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.



Mr Marek Waligórski, DEng. – Doctor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

Dr inż. Marek Waligórski – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

