

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

PTNSS–2015–3396

Numerical analysis of the reactive cylinder vibration signal caused by fuel stream in terms of using obtained results to evaluate the fitness of the injector

This article presents the results of an innovative method of diagnosing the injector based on an analysis of the vibration signal reflecting the process of fuel injection process from diesel engine injectors. Analysis of the available solutions showed that the current diagnostic methods of the injectors on automotive market is inadequate. The aim of the study was to obtain reliable and cheap method for correct and complete diagnosis of functional characteristics of the injector. In order to verify the methods, a test stand was developed, whose design was adapted to the assumptions of measurement. As part of the study the vibration signal for the fuel injection process and the different operating states of the injector diesel engine was analyzed. The study also reflects the changes in the parameters of his operation, in order to build a functional dependencies of vibro-acoustic measurement process of selected working conditions of the injector. Numerical analysis of the signals was made in the time domain, the process and the frequency transformation using Fast Fourier Transformation.

Key words: injector, diagnosis, vibration signal, spray

Analiza numeryczna sygnału drganiowego tulei reakcyjnej wywołanego rozpyloną strugą paliwa w aspekcie wykorzystania uzyskanych wyników do oceny zdolności wtryskiwacza

W artykule przedstawiono wyniki badań innowacyjnej metody diagnozowania wtryskiwaczy opartej na analizie sygnału drganiowego odzwierciedlającego proces wtrysku paliwa z wtryskiwaczy silnika ZS. Analiza dostępnych rozwiązań wykazała, że obecne na rynku motoryzacji metody diagnozowania wtryskiwaczy są niewystarczające. Celem badań było uzyskanie niezawodnej i taniej metody pozwalającej na pełną diagnozę oceny poprawności charakterystyk funkcjonalnych wtryskiwacza. W celu weryfikacji metody opracowano stanowisko badawcze, którego projekt dostosowano do przyjętych założeń pomiarowych. W ramach pracy dokonano analizy sygnału drganiowego dla procesu wtrysku paliwa i różnych stanów eksploatacyjnych wtryskiwacza silnika ZS. W ramach badań odzwierciedlano również zmiany parametrów jego pracy, tak by zbudować zależności funkcyjne miar procesu wibroakustycznego od wybranych warunków pracy wtryskiwacza. Analizy numerycznej sygnałów dokonano w dziedzinie czasu, wartości procesu i częstotliwości, z zastosowaniem szybkiej transformacji Fouriera.

Słowa kluczowe: wtryskiwacz, diagnostyka, sygnał drganiowy, rozpylenie

1. Wprowadzenie

Rozwój motoryzacji skupia się w głównej mierze wokół tematu ograniczenia emisji związków szkodliwych spalin oraz poprawy parametrów eksploatacyjnych silnika. Wyznaczony kierunek rozwoju przyczynia się do zwrócenia uwagi również na etap eksploatacji pojazdów i ich okresowej weryfikacji w aspekcie oddziaływania na środowisko. Dlatego prowadzi się szereg prac związanych z opracowaniem metodyki badań i testów oceny eksploatowanych pojazdów oraz ich systemów pod względem ekologicznym. Dokładność prowadzonych badań i testów jest ważna nie tylko w fazie

projektowania elementu pojazdu, ale również podczas diagnozy sprawności już pracującego układu. Trafność diagnozy pozwala na wyeliminowanie nieprawidłowo pracujących układów, których działanie prowadzi do strat energii, zwiększenia emisji zanieczyszczeń i zwiększenia kosztów eksploatacji. Kwestie te w odniesieniu do silnika spalinowego wskazują na istotne znaczenie poprawności działania układu zasilania. Układ ten ma bezpośredni związek z jakością procesu spalania realizowanego w silniku, który wprost przekłada się na zużycie paliwa i emisję zanieczyszczeń.

W artykule opisano metodę umożliwiającą diagnostykę stanu wtryskiwacza paliwa silnika ZS,

który jest jednym z elementów układu wtrysku paliwa najbardziej narażonym na uszkodzenia. Obecnie istnieją dwie główne metody diagnostyki wtryskiwaczy. Pierwszą z nich jest metoda optyczna umożliwiająca ocenę obrazów rozpylonej strugi paliwa z wykorzystaniem narzędzi numerycznych do analizy obrazów rozprzestrzeniającej się strugi w przestrzeni. Wysokie koszty zakupu aparatury badawczej do tego celu i konieczność zatrudnienia wysokospecjalizowanej kadry, stają się zaporą w jej powszechnym zastosowaniu. Metoda ta jest zazwyczaj wykorzystywana w jednostkach naukowo-badawczych i nie nadaje się do zastosowań warsztatowych. Analiza uzyskanych informacji w wyniku stosowania metody optycznej pozwala na jednoznaczną ocenę jakości uzyskiwanego rozpylenia paliwa podczas pracy wtryskiwacza.

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 otworki rozpylające rozpylacza. Wadą metody jest brak informacji o rozkładzie przestrzennym strugi w cylindrze, która jest istotna dla uzyskania pełnej informacji o stanie wtryskiwacza. Metodą, która z założenia powinna zawrzeć zalety metody optycznej jak i przelewowej jest proponowana metoda wibroakustyczna. Jednym z głównych atutów metody jest stosunkowo mały koszt aparatury. Wadą metody jest konieczność dysponowania bazą danych tzw. wtrysków wzorcowych, które stanowią odniesienie dla badanego obiektu. Podejście wibroakustyczne do diagnozy wtryskiwaczy pozwala na uzyskanie szybkiej i wymiernej informacji o poprawności rozpylenia paliwa.

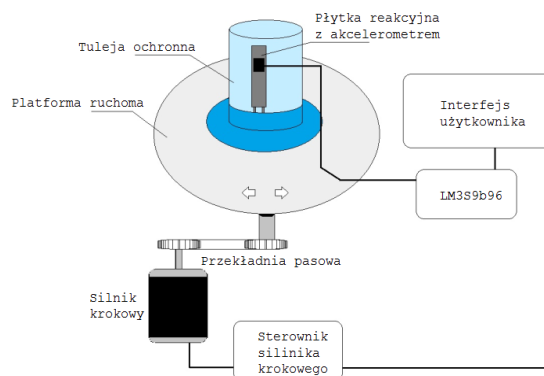
W przedstawionym artykule zawarto wyniki badań oraz wnioski z przeprowadzonych testów wtryskiwaczy metodą wibroakustyczną, które zestawiono z wynikami badań optycznych parametryzacji i oceny rozpylenia. Na potrzeby realizacji badań opracowano i zbudowano prototyp stanowiska badawczego, który z założenia ma mieć docelowy charakter testera wtryskiwaczy.

2. Cel i metodyka badań

2.1. Cel i obiekt badań

Celem przeprowadzonych prac jest ocena parametryczna sygnału drganiowego tulei reakcyjnej wywołanego rozpyloną strugą paliwa w aspekcie wykorzystania uzyskanych wyników do oceny jakości rozpylenia, a przez to zdatności wtryskiwacza. Obiektem prowadzonych badań były strugi rozpylonego paliwa uzyskane z wtryskiwaczy silni-

ków o zapłonie samoczynnym. Część pomiarowa jest układem odpowiedzialnym za uzyskanie sygnału wibroakustycznego badanego wtryskiwacza. W trakcie prac zwrócono szczególną uwagę na odizolowanie mierzonego sygnału od zakłóceń zewnętrznych. Ideowo najistotniejszą częścią zbudowanego stanowiska jest część pomiarowa (rys. 1), która składa się z następujących elementów: 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 przyspieszenia drgań realizowano w osi Z – prostopadłej do powierzchni tulei.

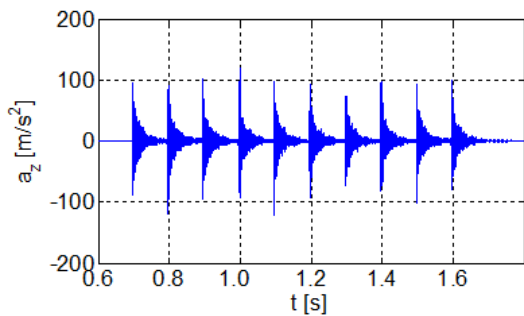


Rys. 1. Stanowisko badawcze i schemat ideowy części pomiarowej

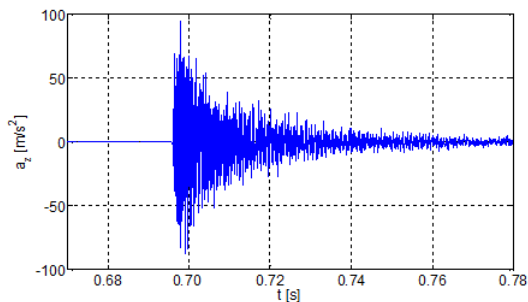
2.2. Metodyka badań

W trakcie realizacji badań dokonano rejestracji przebiegu zmian sygnału przyspieszeń drgań w kierunku Z – normalnym do powierzchni tulei. Sygnały zarejestrowano dla wybranych rozpylaczy przy ustalonych parametrach zasilania paliwem tj. p_w – ciśnienie paliwa w zasobniku paliwa przed wtryskiwaczem, t_w – czas otwarcia wtryskiwacza. W trakcie badań realizowano serie dziesięciu wtrysków podczas których rejestrowano sygnał przyspieszeń drgań tulei (rys. 2) wywołanych uderze-

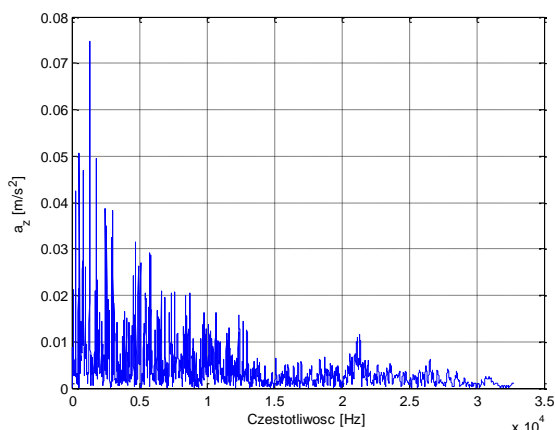
niem rozpylonej strugi. Z zarejestrowanego przebiegu sygnału wyodrębniono fragment dotyczący pojedynczego wtrysku (rys. 3) i poddano go następnie analizie częstotliwościowej (rys. 4).



Rys. 2. Przebieg czasowy zmian sygnałów przyspieszeń drgań a_z w kierunku Z podczas wtrysku paliwa do komory pomiarowej jako odpowiedź tulei na wymuszenie procesem wtrysku
 $p_w = 80 \text{ MPa}$, $t_w = 0,8 \text{ ms}$, rozpylacz F3



Rys. 3. Przebieg czasowy zmian sygnału przyspieszeń drgań a_z w kierunku Z podczas wtrysku paliwa do komory pomiarowej jako odpowiedź tulei na wymuszenie procesem wtrysku wyodrębniony dla pojedynczego procesu wtrysku
 $p_w = 80 \text{ MPa}$, $t_w = 0,8 \text{ ms}$, rozpylacz F3



Rys. 3. Przebieg częstotliwościowy widma sygnału przyspieszeń drgań a_z w kierunku Z podczas wtrysku paliwa do komory pomiarowej jako odpowiedź tulei na wymuszenie procesem wtrysku
 $p_w = 80 \text{ MPa}$, $t_w = 0,8 \text{ ms}$, rozpylacz F3

Analiza sygnałów wibroakustycznych uzyskanych w ramach badań procesu wtrysku do komory pomiarowej dotyczy oceny przebiegów czasowych powyższych sygnałów. Ocena jakościowa tych przebiegów daje możliwość określenia relacji diagnostycznych w przypadku zmiany charakterystyk funkcjonalnych elementów rozpylaczy.

Przeprowadzone badania w zakresie oceny jakościowej sygnałów, uzyskane wyniki i ich analiza pozwoliły stwierdzić, że zarejestrowane przebiegi sygnałów drgań w sposób bezpośredni niosą ze sobą ilość informacji niewystarczającą do oceny procesu rozpylenia paliwa. Natomiast charakterystyka widmowa zarejestrowanych sygnałów analizowana w niskim zakresie częstotliwości $0-0,2 \cdot 10^4 \text{ Hz}$, zawiera istotne informacje związane z procesem realizowanego wtrysku paliwa. Dlatego przeprowadzono analizę wyników z badań zasadniczych ukierunkowaną na interpretację sygnałów na podstawie charakterystyk częstotliwościowych przyspieszeń drgań tulei reakcyjnej.

Analiza sygnałów wibroakustycznych uzyskanych w ramach badań procesu wtrysku do komory pomiarowej dotyczy oceny przebiegów czasowych powyższych sygnałów. Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania, w którym realizowano przyjęte procedury matematyczne zgodnie z opracowanym programem. Przeprowadzona wstępna ocena zarejestrowanych sygnałów pozwala wnioskować o możliwości wykorzystania ich w analizie wybranych procesów oceny diagnostycznej poprawności rozpylenia paliwa z wtryskiwaczy silników o zapłonie samoczynnym. Ocena jakościowa tych przebiegów pozwala na możliwość określenia relacji diagnostycznych w przypadku zmiany charakterystyk geometrycznych i funkcjonalnych elementów układu zasilania, których niesprawności przyczyniają się do zmian parametrów procesu wtrysku. Wstępna ocena sygnałów pozwoliła na określenie wrażliwości sygnałów na zmiany parametrów wtrysku paliwa (ciśnienia wtrysku i jego czasu) oraz zmiany geometryczne elementów wtryskiwacza wymuszające powstanie niesprawności systemu. Zarejestrowane przebiegi czasowe potwierdziły różnice w ilości informacji, jakie można uzyskać z powyższych parametrów drgań i ciśnienia akustycznego.

Zmiany parametrów wtrysku paliwa i stopnia niesprawności elementów w zespole wtryskiwacza powodowały następujące skutki w przebiegach czasowych sygnałów wibroakustycznych:

1. istnieje odwzorowanie między odpowiedzią struktury tulei komory pomiarowej na uderzenie strugi paliwa o jej ścianki wskutek wtrysku paliwa do komory poprzez wtryskiwacz a sygnałem drganiowym. Charakter zmian sygnałów drganiowych odzwierciedla zmiany w procesie;

2. istnieje relacja między zmianami zachodzącymi w procesie roboczym wtrysku paliwa do komory i efektem wtórnym jego oddziaływania na

strukturę tulei a zmianami w sygnale drganiowym. Zmiany powyższe mają charakter amplitudowy oraz energetyczny;

3. niewielki udział zakłóceń sygnałów przyspieszeń drgań przy jednoczesnej dużej ich amplitudzie i wrażliwość diagnostyczna procesu resztkowego na wymuszenie impulsowe od procesu wtrysku objawia się w ściśle określonym i jednoznacznym charakterze zmian sygnału wraz z kolejnymi zmianami stanu procesu. Duże wartości amplitud kwalifikują sygnał do oceny diagnostycznej z punktu widzenia ich rozróżnialności. Jednoznaczność charakteru sygnału jest zachowana dla kolejnych procesów, jedynie ich wartość amplitudowa jest różna. Te różnice sugerują również zmienność tych miar procesu, które dają pośrednie informacje o ilości energii przekazywanej w procesie;

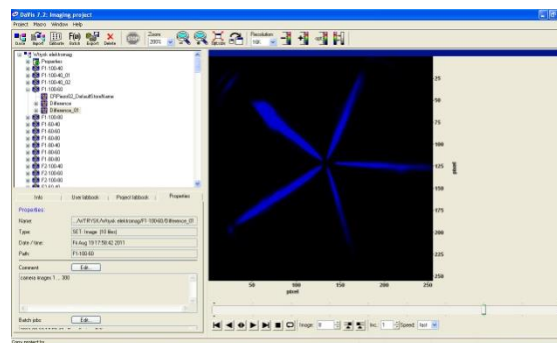
4. ocena kierunków rejestracji sygnałów dla danej wartości ciśnienia i czasu wtrysku oraz rodzaju rozpylacza, dowodzi różnej wrażliwości każdego z nich na proces, tym bardziej widocznej, im wyższe są wartości ciśnienia wtrysku paliwa;

5. zwiększeniu wartości ciśnienia wtrysku paliwa towarzyszy zwiększenie amplitudy przyspieszeń drgań. Wrażliwość sygnałów drganiowych na proces wskazuje, iż to właśnie one powinny być brane do procesu diagnostycznego;

6. zmianom amplitudowym towarzyszącym wzrostowi ciśnienia wtrysku nie towarzyszy zmiana charakteru sygnału, jest ona zachowana dla każdego z kierunku rejestracji drgań. Analiza amplitud drgań sygnałów uzyskanych z tulei pomiarowej dla stałej wartości ciśnienia wtrysku i jego czasu wskazuje na tendencję do obniżania się jej największej wartości wraz ze wzrostem stopnia niesprawności rozpylacza wtryskiwacza. Powyższa tendencja występuje dla różnych ciśnień i czasów wtrysku paliwa.

W przypadku porównania wartości przyspieszenia drgań tulei wywołanych wtryskiem paliwa z wykorzystaniem rozpylaczy nowych stwierdzono podobne zakresy wartości przyspieszeń drgań. Podobną sytuację stwierdzono w porównaniu procesu wtrysku z wtryskiwaczy nowych, różniących się liczbą otworków rozpylających [3]. W związku z tym można stwierdzić, że o wartościach przyspieszeń drgań tulei reakcyjnej nie decyduje liczba otworków rozpylacza, tylko miary fizyczne procesu wtrysku. Dlatego zmiany wartości drgań tulei reakcyjnej w kierunku Z, wywołane procesem wtrysku paliwa wykorzystano w analizie porównawczej przeprowadzonej dla wyników z dwóch etapów badań, badań analizy obrazów rozpylonej strugi paliwa (rys. 4) i badań oceny rozpylenia paliwa metodą analizy drgań tulei reakcyjnej.

Zestawienie uzyskanych wyników dla wybranego punktu badawczego charakteryzowanego parametrami $p_w = 80$ MPa, $t_w = 0,8$ ms przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 4. Okno programu DaVis 7.2 z obrazem wyodrębnionych obszarów strug paliwa po odjęciu tła pomiarowego dla pojedynczego procesu wtrysku $p_w = 80$ MPa, $t_w = 0,8$ ms, rozpylacz F3

Tab. 1. Zestawienie wyników badań dwoma metodami przy $p_w = 80$ MPa, $t_w = 0,8$ ms

Rozpylacz	Parametr	
	A_s [mm ² /mm]	$a_{z, max}$ [m/s ²]
I1 – nowy	6,0	0,065
S1– nowy	6,2	0,055
S2– nowy	5,3	0,040
W1– nowy	5,5	0,055
F1	7,5	0,110
F2	11,8	0,132
F3	11,0	0,225
S2F4	12,0	0,352
S25	13,5	0,210
S6	10,1	0,075

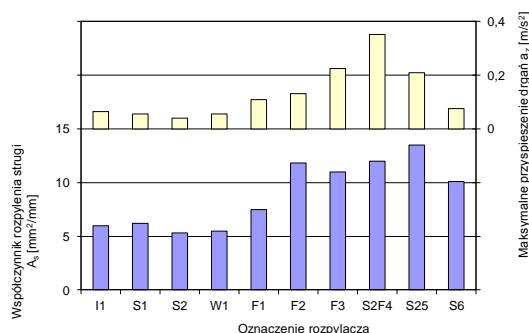
Badania przeprowadzono dla kilku wybranych wtryskiwaczy a uzyskane wyniki porównano z parametrami rozpylenia paliwa – wyrażonych jako współczynnik rozpylenia strugi A_s – uzyskanymi z tych wtryskiwaczy przy takich samych parametrach zasilania.

3. Wyniki analizy

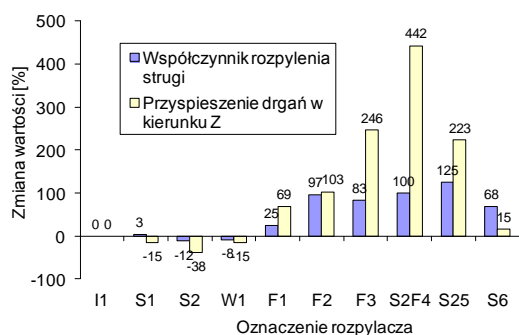
W przeprowadzonej analizie porównawczej dokonano zestawienia wartości współczynnika rozpylenia strugi paliwa A_s oraz wartości przyspieszenia drgań w kierunku Z – a_z , w zakresie częstotliwości 0–0,2 · 10⁴ Hz wyznaczonych dla wybranych rozpylaczy (rys. 5). Porównanie tych parametrów jako charakteryzujące proces rozpylenia wskazuje na duże podobieństwo w rozkładzie wartości. Przedstawione wartości poddano analizie porównawczej przeprowadzonej w odniesieniu do wyników uzyskanych dla rozpylacza wzorcowego I1 (rys. 6).

Z wzajemnego porównania wartości względnej zmian analizowanych parametrów: współczynnika rozpylenia strugi i przyspieszeń drgań występujących na tulei reakcyjnej w kierunku Z, wynika, że

większą intensywnością zmian charakteryzują się wartości przyspieszenia drgań tulei reakcyjnej w kierunku Z.



Rys. 5. Zestawienie wartości maksymalnej przyspieszeń drgań a_z w kierunku Z, z wynikami badań optycznych rozpylenia przy $p_w = 80$ MPa, $t_w = 0,8$ ms



Rys. 6. Porównanie uzyskanych zmian analizowanych parametrów względem wartości uzyskanych dla rozpylacza I1, przy $p_w = 80$ MPa, $t_w = 0,8$ ms

Potwierdzają to procentowe różnice uzyskanych zmian w przypadkach poszczególnych rozpylaczy. Sytuacja ta ma miejsce w przypadku wszystkich porównywanych wtryskiwaczy z wyjątkiem rozpylacza S6. W związku z czym można stwierdzić, że metoda oceny procesu rozpylenia z wykorzystaniem analizy drgań tulei reakcyjnej charakteryzuje się większą czułością niż przeprowadzona analiza rozpylenia na podstawie zarejestrowanych obrazów strug paliwa. W przypadku porównania względnego analizowanych wartości uzyskanych podczas roz-

pylenia paliwa realizowanego z wykorzystaniem rozpylacza S6, uzyskano odwrotny charakter zmian. Zmiana wartości współczynnika rozpylenia okazała się większa od zmiany względnej przyspieszenia drgań tulei reakcyjnej. W przypadku tym należy podkreślić, że rozpylacz S6 jest siedmiootworowy, a porównanie względne przeprowadzone z rozpylaczem I1 (pięciotworowym) należy traktować jako analizę możliwości proponowanej metody. Przypadek ten potwierdza istotność obiektu wzorcowego, względem którego należy dokonywać oceny porównawczej.

Zmiany wartości parametrów ciśnienia wtrysku, czasu otwarcia wtryskiwacza, wymuszające zmienność sygnałów wibroakustycznych wnoszą informację, iż istnieje między nimi ściśle określona relacja, co daje podstawy do dalszej analizy sygnału, tzn. w dziedzinie wartości procesów i częstotliwości. Niezbędne jest, aby w dalszych etapach uwzględnić powyższe zmienności przez zastosowanie analizy statystycznej.

4. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań i uzyskane wnioski z przeprowadzonych wielu etapów prac związanych z realizacją projektu miały charakter porównawczy i podsumowujący. Zrealizowano badania wizualizacyjne procesu rozpylenia dla wtryskiwaczy o rozpylaczach generujących różne rozpylenie w zależności od ich stopnia zużycia. Drugim typem badań były badania procesu rozpylenia paliwa z wykorzystaniem metody analizy wartości przyspieszeń drgań tulei reakcyjnej, wywołanych uderzającą w tuleję strugą paliwa. Z porównawczego charakteru badań i przeprowadzonej analizy wyników stwierdzono korelację uzyskanych wartości współczynnika rozpylenia strugi z wartością przyspieszeń drgań tulei reakcyjnej w kierunku Z.

Na obecnym etapie realizacji projektu prowadzone są prace związane z opracowaniem algorytmu matematycznego do analizy sygnału drganiowego i jego implementacja w postaci programu komputerowego do obsługi stanowiska.

Skróty i oznaczenia

p_w – ciśnienie paliwa na zasilaniu wtryskiwacza
 t_w – czas wtrysku

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 spalinowych. Pojazdy Szynowe, 2002, nr. 4., s. 30-40.

-
- [3] Merkisz J., Markowski J., Bajerlein M., Wali-górski M., Mądry J., Ocena rozpylenia paliwa z wykorzystaniem procesów wibroakustycznych. IV Międzynarodowy Kongres Silników Spalinowych 16-17 czerwca 2011, Radom.

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 Szy-nowych TABOR w Poznaniu



Mr. Adam Wrona, DSc., Eng. – finan-cial director of Automex Sp o. o. in Gdańsk
Dr inż. Adam Wrona – zastępca dyrek-tora ds technicznych. Automex Sp. o. o. w Gdańsku



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



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.



- [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. 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 Mateusz Dedo, Eng – desing-er/progammer of Automex sp. z o.o., Gdańsk
Inż. Mateusz Dedo – konstruk-tor/programista Automex sp. z o.o., Gdańsk



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

