

Use of bispectral measures in the defects analysis of the fuel supply system of the self-ignition engine

Abstract: The central issue is extract the relevant diagnostic information from vibroacoustic signal of engine and use it in defects analysis process. The value of the information contained in the bispectrum consists of, among others, the fact that it enables examination of statistical relations between individual components of the spectrum as well as to detect the components generated as a result of occurrence of non-linear effects and the additional feedback associated with the emerging defects. Thus mean that bispectral measures like: diagonal bispectrum, row bispectrum, max bispectrum, residual bispectrum are useful in detection of engine defects. The object of the experiment was a type S359 run-in six-cylinder, in-line, unsupercharged engine with self-ignition. We realized an active experiment during which we changed the values of parameters of the technical condition without disassembling the engine or only while disassembling some of its elements but while not disturbing the main structure of the engine. The goal of the paper was to demonstrate that it is possible to diagnose defects in a self-ignition engine based on bispectral measures. It's confirm the conclusion that non-linear effects are dominant in defects development.

Key words: vibroacoustic diagnostics of the self-ignition engine, bispectral analysis, bispectral measures

Wykorzystanie miar bispektralnych w analizie uszkodzeń układu zasilania silnika ZS

Streszczenie: Głównym zadaniem było wyextrachowanie istotnej diagnostycznie informacji z sygnału wibroakustycznego, zarejestrowanego na silniku i wykorzystanie jej w procesie analizy uszkodzeń. Cennaść informacji zawartej w bispektrum polega na tym, że pozwala ono badać statystyczne zależności pomiędzy poszczególnymi składowymi widma oraz wykrywać składowe powstałe w wyniku występowania efektów nieliniowych i dodatkowych sprzężeń zwrotnych związanych z powstającymi uszkodzeniami. Oznacza to, że miary bispektralne takie ja: bispektrum diagonalne, bispektrum wierszowe, bispektrum maksymalne, bispektrum residualne są użyteczne w wykrywaniu uszkodzeń silnika. Obiektem badań był rzędowy, sześciocylindrowy, wolnossący silnik o zapłonie samoczynnym typu S359. Zrealizowano eksperyment czynny, podczas którego zmieniano parametry stanu technicznego bez demontażu silnika lub z demontażem pewnych elementów, nie zaburzającym jednak głównej struktury silnika. Celem pracy było wykazanie, że możliwe jest diagnozowanie uszkodzeń w silniku ZS, na podstawie miar bispektralnych. Potwierdza to wniosek o dominowaniu efektów nieliniowych w powstawaniu uszkodzeń.

Słowa kluczowe: diagnostyka wibroakustyczna silnika ZS, analiza bispektralna, miary bispektralne

1. Introduction

The issues of detection of maladjustment and other defects having influence on the quality of operation, including the quality of combustion, which determines e.g. fuel consumption, exhaust gas toxicity or noisiness, occupy a particularly important place among the methods of piston combustion engine diagnosis. The notion of regulative parameters includes these parameters of a structure which define a given technical condition of the examined engine and whose values can be modified with a certain range, as defined in the operating manual of such an engine, while performing technical maintenance. The parameters which determine the quality of fuel combustion in self-ignition engine (CI) are mainly the angle of advance, the injection pressure and the fuel dose. Reliability tests of vehicles powered by SI engines demonstrate at the same time that these parameters are the only ones in

the structure that are most often affected by undesirable changes during operation of vehicles [1].

Increasing operational requirements set for devices and machines because of safety reasons and due to need for operating cost minimization result in the need for searching for new methods of defect detection in diagnosed objects, e.g. based on the analysis of vibroacoustic signals [2, 3]. The natural feature of vibroacoustic diagnosis is the possibility of easy and fast registration of a big number of heavily redundant vibroacoustic signals and the associated surplus of information. This leads to the necessity of reducing the utilized information down to the level enabling building of an adequate diagnostic model [4].

2. Bispectral measures

The central issue is how to extract the relevant diagnostic information and use it in the diagnosis

process, especially the low-energy fatigue development stages [5].

Let us note that the measured vibroacoustic signal is a real signal which fulfils the requirement of causality. Thus, by using the measured signal $z(t)$ and a defined formalism, we are able, by means of addition of an imaginary part of $v(t)$, to form an analytical signal:

$$a(t) = z(t) + jv(t) \quad (1)$$

In accordance with the theory of analytical functions the real and the imaginary components are functions with two variables x and y .

Let us assume that the analysis of analytical signal is conducted on the basis of observation of the changes of the length of vector A and the phase angle of φ :

$$z(x, y) + jv(x, y) = A(\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad (2)$$

Thus,

$$z = A \cos \varphi, \quad v = A \sin \varphi \quad (3)$$

which means that the measured signal is an orthogonal projection of the vector A on the real axis. Basing on Cauchy-Riemann condition, finally we get:

$$\frac{dz}{d\tau} = \frac{dA}{d\tau} \cos \varphi - A \sin \varphi \frac{d\varphi}{d\tau} \quad (4)$$

The obtained relationship, in accordance with our expectations, presents an equation which enables the analysis of the measured signal on the basis of observation of A and φ . What simultaneously captures our attention is the fact that for the low-energy processes, when we can disregard the changes of vector length and assume that $A \cong \text{const}$, the whole information about the changes in the measured signal is contained in the phase angle:

$$\frac{dz}{d\tau} = -A \sin \varphi \frac{d\varphi}{d\tau} \quad (5)$$

The well known fact is, that the power spectrum based methods cannot detect the phase relationship between different frequency components and additionally suppresses the phase information. It is therefore necessary to explore spectral measures of higher order, like the bispectral measures, to detect various forms of phase coupling between frequency components. Investigating this possibility we try to write, the bispectrum in form [6, 7]:

$$B(f_x, f_y) = E[S(f_x)S(f_y)S^*(f_x + f_y)] \quad (6)$$

It is easy to see the bispectrum is complex and that the bispectral values depend on two frequencies f_x and f_y . Writing the Eq. (6) in terms of amplitude and phase quantities one becomes:

$$B(f_x, f_y) = |S(f_x)||S(f_y)||S(f_x + f_y)|e^{j\Theta_\beta(f_x, f_y)} \quad (7)$$

where $\Theta_\beta(f_x, f_y) = \Theta(f_x) + \Theta(f_y) - \Theta(f_x + f_y)$ and is called the biphas.

Using the fast Fourier transform (FFT) algorithm it is possible to calculate the raw bispectrum:

$$B_i(f_x, f_y) = S_i(f_x)S_i(f_y)S_i^*(f_x + f_y) \quad (8)$$

The raw bispectrum can be estimate over the inner triangular region $0 \leq f_y \leq f_x, f_x + f_y = f_\mu / 2$.

This is sufficient for a complete description of the bispectrum, since, due to symmetry in the $f_x - f_y$ plane of the bispectrum, all of the significant information is contained in the principal domain that consists of the inner and outer triangles [7].

In addition to the basic bispectrum, the bispectrum diagonal is defined as:

$$B(f, f) = E[S(f)S(f)S^*(2f)] \quad (9)$$

with $f_x = f_y = f$.

The bispectrum diagonal is especially useful in detection of nonlinear effect.

The assumed procedure was verified while examining the engine with self-ignition during a diagnostic experiment.

3. The experiment

The object of the experiment was a type S359 run-in six-cylinder, in-line, unsupercharged engine with self-ignition [8]. While developing this paper, we realized an active experiment during which, we changed the parameters of the technical condition without disassembling the engine or only while disassembling some of its elements but while not disturbing the main structure of the engine. Based on the object's identification, we restricted the changes only to three parameters: angle of advance of injection, dose of fuel injected into one cylinder and change of injection pressure in one injector [9]. Change of the angle of advance of injection was realized by relevantly turning the injection pump shaft in respect of the injection pump clutch shaft. One of the two values of angle of advance of injection was set: the nominal value (18.5°) or the reduced value (8°). Change of fuel dose was realized for the selected (second) piston section by totally disconnecting the injector from the piston section. One of the two values were set: the nominal or zero value in the entire range of the crankshaft speed. The change of injection pressure was realized for one injector which injected fuel to the selected (second) cylinder of the engine. The change was effected by changing the tension of the pin's compression spring. One of the two values of injection pressure was set: the nominal value (21.5 MPa) or the reduced value (10 MPa). As a result, the tests were conducted for nine simulated technical condi-

tions of which two were defined as proper (Table 1).

Table 1. Simulated technical conditions

No	Description of the technical condition
1	Engine without defects (starting settings of nominal values of adjustable parameters)
2	Disconnected injector
3	Reduced injection pressure
4	Reduced injection pressure, disconnected injector
5	Reduced angle of advance of injection
6	Reduced angle of advance of injection, disconnected injector
7	Reduced angle of advance of injection, reduced injection pressure
8	Reduced angle of advance of injection, reduced injection pressure, disconnected injector
9	Engine without defects (resetting of nominal values of adjustable parameters)

Due to the fact that the obtained results of tests were potentially intended to serve the purpose of developing a new method of engine diagnosis, thus we decided to carry out the tests with engine speeds possible to achieve during operational diagnosis of vehicles operating without external load, that is in neutral gear and maximum regulated speed. Non-application of load resulted from the fact that use of constant and strictly defined loads for a car's power transmission system during diagnostic tests calls for a diagnostic station to be equipped with engine test-bed, (which is a rarity. The reason for setting such operational conditions was the fact that while using, in the case of the examined engine, two-band rotational speed regulators it proved possible to determine, in the case of lack of external load, the intermediate rotational speeds. The factory settings of injection pumps ensured maintaining of engine speed of 500-650 rpm in neutral gear and the maximum engine speed of ca. 3100 rpm [8].

Measurements of vibration signals were made for an engine warmed up to operational temperature.

A technological feeder on the center-line of the crankshaft, on the right-hand side of the engine, as well as the flat area of the head on the center-line of the second cylinder, in the place where the head is connected to the engine block on the left-hand side of the engine, were chosen as the places for recording vibration [9]. These places, located near to the places where majority of vibration signals are generated in this engine, are shown in Fig. 1. Vibration detectors were mounted with the use of threaded connections on flat areas.

The registration of vibroacoustic signals, that is the time runs (functions) of acceleration of vibrations which are perpendicular to the surfaces on which the detectors are mounted, was performed

with the use of piezoelectric charge vibration detectors of B&K 4384 type simultaneously in both measuring points [10].

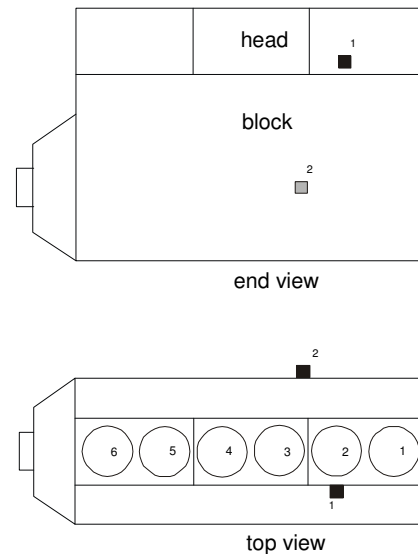


Fig. 1. Diagram showing location of measurement points in an engine

1 – point where a sensor is mounted to engine head, 2 – point where a sensor is mounted to engine body,

① ÷ ⑥ – engine cylinders

The obtained charge signals were converted to voltage signals and amplified in a charge amplifier of B&K NEXUS type. Registration of a strobing signal was performed with the use of a photo-electric sensor manufactured by the Non-electrical Dimensions Electronic Measurements Plant. All the signals were registered and analyzed with the use of the Roadrunner analytical-and-measurement system from Skalar Instruments. The signals were registered during 5 s (a time that is over 2 times longer than the duration of 20 revolutions of the crankshaft of the engine operating in idle mode and over 12 times longer than the duration of 20 revolutions of the crankshaft of the engine operating at maximum regulated speed – the number of revolutions used for synchronic averaging), while sampling the signals with frequency of 10 kHz. On their basis we defined discrete amplitude-and-frequency spectra of vibration acceleration averaged synchronically in the range of 0-2000 Hz with resolution of ca. 0.04 Hz (thanks to multiplying by 250 the obtained averaged time runs of vibration signals for the neutral gear and multiplying by 1250 the obtained averaged time runs of vibration signals for the maximum regulated speed, which resulted in ca. 25-second time runs of this signals), subject to the adopted duration of one revolution of the examined engine's crankshaft. The configuration of the measurement signal is presented schematically in Fig. 2.

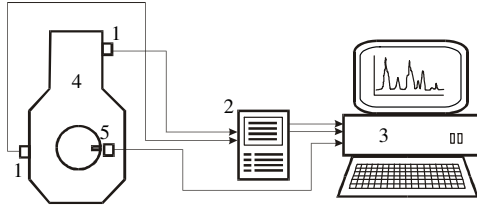


Fig. 2. Diagram of a measuring system
 1 – B&K 4384 vibration acceleration sensors,
 2 – B&K NEXUS load/charge amplifier,
 3 – Skalar Instruments „Roadrunner” measurement-
 and-analytical system, 4 – engine,
 5 – engine crankshaft rotational speed sensor

4. Analysis of the experimental results

In the first step the vibroacoustic signal from channel no. 1 (Fig. 1) was synchronized, then for further processing it was transmitted the signal coming for a single crankshaft revolution (to eliminate the rotational frequency of the shaft and the related disturbance) - for neutral gear speed. For maximum regulated speed the vibroacoustic signal from channel no. 1 was synchronized too. Then for further processing it was transmitted the signal coming for five crankshaft revolution (in purpose to prevent the frequency resolution). The next step involved transferring the results, by bispectrum, to the frequency, plane of frequency and calculating diagonal (Fig. 3a, 4a) and maximum bispectrum (Fig. 3b, 4b) to building the bispectral measures [11] in the function of simulated failures of the engine. The next step was to create a new measure which would be able to detect failures in a much better way. Integrals for the each measurement were calculated based on the graphs of the maximum bispectrum calculated on the basis of a triangular matrix – the residual bispectrum (Fig. 3c, 4c), which emerged as a result of cutting out the main diagonal which described the impact of modulation phenomena and non-linear effects.

Next, integrals of bispectral noise from bispectral residual maximum diagrams was calculated with maximum level 500 [m/s²] – for neutral gear speed (everything higher than maximum level was equalize to this maximum level) for nine technical conditions of the engine (Fig. 5).

The same bispectral measure was calculated for maximum regulated speed (Fig. 6, 7).

Integral of bispectral noise from bispectral residual maximum diagrams (for maximum regulated speed) was calculated with maximum level 5000 [m/s²] (Fig. 8).

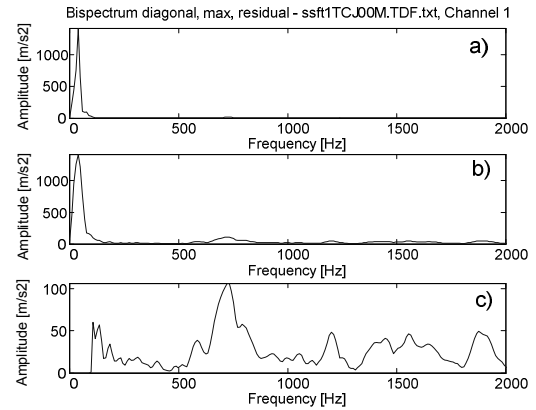


Fig. 3. Bispectrum's measures calculated for neutral gear speed, engine without defects:
 a) bispectrum diagonal, b) maximum bispectrum,
 c) residual bispectrum

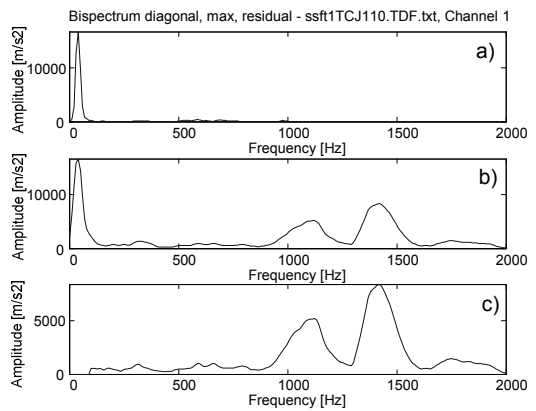


Fig. 4. Bispectrum's measures calculated for neutral gear speed, reduced angle of advance of injection, reduced injection pressure:
 a) bispectrum diagonal, b) maximum bispectrum,
 c) residual bispectrum

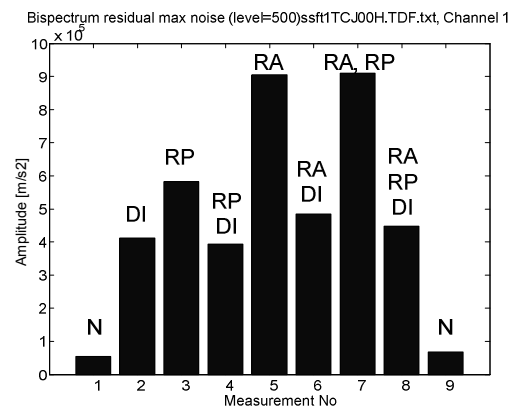


Fig. 5. Integral of bispectral noise from bispectral residual maximum diagrams, for neutral gear speed, nine technical conditions:
 N – nominal state (engine without defects),
 DI – disconnected injector,
 RP – reduced injection pressure,
 RA - reduced angle of advance of injection

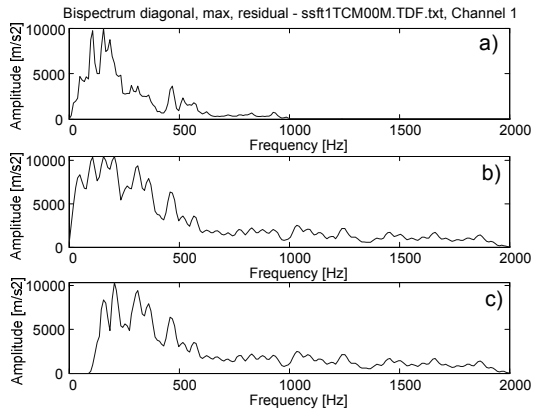


Fig. 6. Bispectrum's measures calculated for maximum regulated speed, engine without defects:
a) bispectrum diagonal, b) maximum bispectrum, c) residual bispectrum

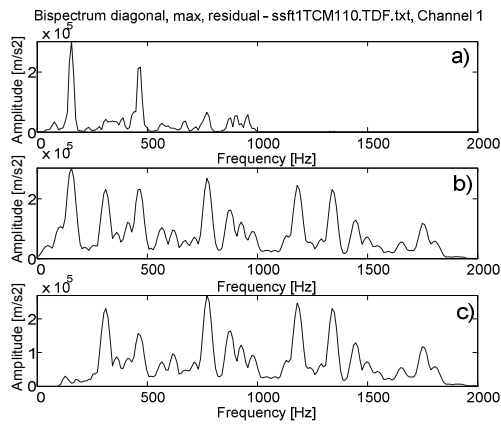


Fig. 7. Bispectrum's measures calculated for maximum regulated speed, reduced angle of advance of injection, reduced injection pressure:
a) bispectrum diagonal, b) maximum bispectrum, c) residual bispectrum

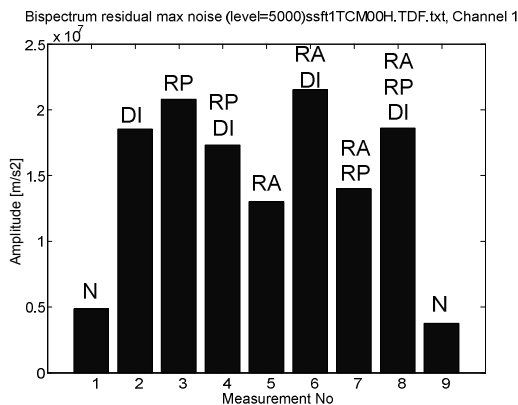


Fig. 8. Integral of bispectral noise from bispectral residual maximum diagrams, for maximum regulated speed, nine technical conditions:
N – nominal state (engine without defects),
DI – disconnected injector,
RP – reduced injection pressure,
RA - reduced angle of advance of injection

For neutral gear speed, we can see, at figure 5, that it is possible to recognize four conditions of the engines technical state:

1. the engine without defects (N) with level under $1 \cdot 10^5$ [m/s²];
2. the engine with disconnected injector – DI (with or without other defects – RA, RP) – level $4 \div 4.5 \cdot 10^5$ [m/s²];
3. the engine with reduced injection pressure (RP) – level about $6 \cdot 10^5$ [m/s²];
4. the engine with reduced angle of advance of injection – RA (with or without reduced injection pressure RP) – level over $9 \cdot 10^5$ [m/s²];

Unfortunately for maximum regulated speed (Fig. 8), we can recognize only three conditions of the engines technical state but the last with error:

1. the engine without defects (N) with level under $0.5 \cdot 10^7$ [m/s²];
2. the engine with reduced angle of advance of injection – RA (with or without reduced injection pressure RP) – level $1.2 \div 1.5 \cdot 10^7$ [m/s²];
3. the engine with disconnected injector – DI (with or without other defects – RA, RP) – level over $1.6 \cdot 10^7$ [m/s²] but with not correct recognised the engine with reduced injection pressure (RP) – level about $2.1 \cdot 10^5$ [m/s²];

We can see that we can build effective and sensitive diagnostic parameter of quality changes of the engines technical state only for neutral gear speed. For maximum regulated speed the noise and disturbances are too much for build effective and sensitive diagnostic parameter.

5. Conclusions

The work shows that it is possible to diagnose the changes of the condition of the objects by means of vibroacoustic techniques with an assumption of significantly small energy dissipation. The presented approach not only correctly explains and defines the phenomena from the qualitative point of view but also enables their quantitative evaluation, while maintaining, for defined conditions, a satisfactory consistence.

A significant practical advantage of an approach such as that presented in this paper is that it allows to start diagnose the changes of the condition of the objects without having to develop detailed deterioration models of objects. One can start managing their facilities with a set of bispectral measures, which are not only very sensitive on changes of frequency structure of vibroacoustic signal but also are sensitive on changes of kind of nonlinearity and phase coupling connected with analyzing phenomena.

The analyze of bispectral noise changes could be effective and sensitive diagnostic parameter of quality changes of the engines technical state.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

SI/ZS Self-Ignition/Zapłon Samoczynny

Bibliography/Literatura

- [1] IPM WAT TEAM: Final verification of realization of a research work entitled "Experimental examination of vehicles manufactured by FSC - Starachowice. Results of operational reliability tests of STAR-200 trucks from a trial series. WAT, Warsaw, 1980.
- [2] Mączak J., Local meshing plane as a source of diagnostic information for monitoring the evolution of gear faults. *Engineering Asset Lifecycle Management*, t. 19, D. Kiritsis, C. Emmanouilidis, A. Koronios, i J. Mathew, Ed. London: Springer London, 2010, pp. 661-670.
- [3] Mączak J., Szczurowski K., Research into the influence of environmental conditions on the dynamic response of the prestressed concrete structures. *Institute of Vehicles Scientific Papers*, No 5(81), 2010, pp. 111÷118 (in Polish).
- [4] Dybała J., Use of task-oriented dynamic re-sampling in reduction of signal non-stationarity. *Diagnostyka*, Vol. 48, No 4, 2008, pp. 25÷30.
- [5] Radkowski S., Gumiński R., Spectrum width factor as a diagnostic parameter determining the degree of damage of tooth surface. *Diagnostyka*, Vol. 53, No 1, 2010, pp. 55÷60.
- [6] Radkowski S., Smalko Z., Pięta A., Worpay M.: Use of Bispectral Analysis In Condition Monitoring of Machinery. *Proceedings of Third European Workshop Structural Health Monitoring*, 2006, pp. 627–634.
- [7] Yang W., Towards Dynamic Model-Based Prognostics for Transmission Gears, *SPIE Conference Proceedings*, Vol. 4733, 2001, pp. 157–167.
- [8] Kocia B., Kukliński Z., Łukowski Z., Pałacha R., Zapłowski W.: Construction and repair of STAR 266 and related trucks. *WPM „WEMA”*, Warszawa 1988 (in Polish).
- [9] Boruta G.: Analysis of diagnostic information contained in vibroacoustic signal with the regulated parameters of a piston-type combustion engine Ph.D. thesis, Poznań University of Technology, 2006 (in Polish).
- [10] Boruta G., Jasiński M.: The Multidimensional Diesel Engine Diagnosis Based on the Vibroacoustic signal spectrum analysis. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 15, No. 4, 2008, pp. 63÷72.
- [11] Jasinski M., Radkowski S.: Use of the higher spectra in the low-amplitude fatigue testing. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 25, 2011, pp. 704–716. doi:10.1016/j.ymssp.2010.06.001

Mr Grzegorz Boruta, DSc., – assistant professor in the Mechatronics Chair at University of Warmia and Mazury.

Dr inż. Grzegorz Boruta – adiunkt w Katedrze Mechatroniki Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego.



Mr Marcin Jasiński, DSc., – assistant professor in the Institute of Vehicles at Warsaw University of Technology.

Dr inż. Marcin Jasiński – adiunkt w Instytucie Pojazdów Politechniki Warszawskiej.



Use of bispectral measures in the defects analysis of the fuel supply system of the self-ignition engine

Abstract: The central issue is extract the relevant diagnostic information from vibroacoustic signal of engine and use it in defects analysis process. The value of the information contained in the bispectrum consists of, among others, the fact that it enables examination of statistical relations between individual components of the spectrum as well as to detect the components generated as a result of occurrence of non-linear effects and the additional feedback associated with the emerging defects. Thus mean that bispectral measures like: diagonal bispectrum, row bispectrum, max bispectrum, residual bispectrum are useful in detection of engine defects. The object of the experiment was a type S359 run-in six-cylinder, in-line, unsupercharged engine with self-ignition. We realized an active experiment during which we changed the parameters of the technical condition without disassembling the engine or only while disassembling some of its elements but while not disturbing the main structure of the engine. The goal of the paper was to demonstrate that it is possible to diagnose defects in a self-ignition engine based on bispectral measures. It's confirm the conclusion that non-linear effects are dominant in defects development.

Key words: vibroacoustic diagnostics of the self-ignition engine, bispectral analysis, bispectral measures

Wykorzystanie miar bispektralnych w analizie uszkodzeń układu zasilania silnika ZS

Streszczenie: Głównym zadaniem było wyextrachowanie istotnej diagnostycznie informacji z sygnału wibroakustycznego, zarejestrowanego na silniku i wykorzystanie jej w procesie analizy uszkodzeń. Cennosc informacji zawartej w bispektrum polega na tym, że pozwala ono badać statystyczne zależności pomiędzy poszczególnymi składowymi widma oraz wykrywać składowe powstałe w wyniku występowania efektów nieliniowych i dodatkowych sprzężeń zwrotnych związanych z powstającymi uszkodzeniami. Oznacza to, że miary bispektralne takie jak: bispektrum diagonalne, bispektrum wierszowe, bispektrum maksymalne, bispektrum reidsusualne są użyteczne w wykrywaniu uszkodzeń silnika. Obiektem badań był rzędowy, sześciocylindrowy, wolnossący silnik o zapłonie samoczynnym typu S359. Zrealizowano eksperyment czynny, podczas którego zmieniano parametry stanu technicznego bez demontażu silnika lub z demontażem pewnych elementów, nie zaburzającym jednak głównej struktury silnika. Celem pracy było wykazanie, że możliwe jest diagnozowanie uszkodzeń w silniku ZS, na podstawie miar bispektralnych. Potwierdza to wniosek o dominowaniu efektów nieliniowych w powstawaniu uszkodzeń.

Słowa kluczowe: diagnostyka wibroakustyczna silnika ZS, analiza bispektralna, miary bispektralne

1. Wstęp

Obecnie szczególne miejsce wśród metod diagnostyki tłokowych silników spalinowych zajmują problemy wykrywania rozregulowań i innych usterek wpływających na jakość eksploatacji, w tym na jakość spalania determinującą np. zużycie paliwa, toksyczność spalin czy hałaśliwość. Pod pojęciem parametrów regulacyjnych rozumie się te spośród parametrów struktury, określających dany stan techniczny badanego silnika, których wartości można zmieniać w pewnych zakresach określonych w instrukcji eksploatacji tego silnika podczas wykonywania obsługi technicznych. Parametrami regulacyjnymi determinującymi jakość spalania paliwa w silniku o zapłonie samoczynnym (ZS) są głównie kąt wyprzedzenia i ciśnienie wtrysku oraz dawka paliwa. Badania niezawodności pojazdów napędzanych przez silniki o ZS pokazują jednocześnie, że właśnie te parametry są jednymi z parametrów

struktury najczęściej ulegających niepożądanym zmianom w trakcie eksploatacji pojazdów [1].

Coraz wyższe wymagania eksploatacyjne stawiane urządzeniom i maszynom ze względów bezpieczeństwa oraz minimalizację kosztów eksploatacji, powodują konieczność poszukiwania nowych metod wykrywania uszkodzeń w diagnozowanych obiektach np. na podstawie analizy sygnałów wibroakustycznych [2, 3]. Naturalną cechą diagnostyki wibroakustycznej jest możliwość łatwej i szybkiej rejestracji dużej liczby silnie redundantnych sygnałów wibroakustycznych i związanego z tym dużego nadmiaru informacji, która w znacznej części nie jest wykorzystywana, a równocześnie najczęściej występuje konieczność wykorzystania wielowymiarowego wektora diagnostycznego. Powoduje to konieczność zredukowania wykorzystywanej informacji do poziomu pozwalającego na zbudowanie adekwatnego modelu diagnostycznego [4].

2. Miary bispektralne

Głównym zadaniem jest wyekstrahowanie istotnej informacji diagnostycznej i użycie jest w procesie diagnozy, szczególnie niskoenergetycznych faz rozwoju uszkodzeń [5].

Zauważmy, że zmierzony sygnał wibroakustyczny jest sygnałem rzeczywistym, spełniającym warunek przyczynowości. Zatem, wykorzystując sygnał zmierzony $z(t)$ i określony formalizm, możemy przez dodanie części urojonej $v(t)$, utworzyć sygnał analityczny:

$$a(t) = z(t) + jv(t) \quad (1)$$

Zgodnie z teorią funkcji analitycznych, składowa rzeczywista i składowa urojona są funkcjami dwóch zmiennych x i y .

Przyjmijmy, że analizę przebiegu sygnału analitycznego prowadzimy na podstawie obserwacji zmian długości wektora A i kąta fazowego φ :

$$z(x, y) + jv(x, y) = A(\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad (2)$$

Zatem,

$$z = A \cos \varphi, \quad v = A \sin \varphi \quad (3)$$

oznacza, że mierzony sygnał jest rzutem prostokątnym wektora A na oś rzeczywistą. Stosując warunki Cauchy-Riemann'a, otrzymamy:

$$\frac{dz}{d\tau} = \frac{dA}{d\tau} \cos \varphi - A \sin \varphi \frac{d\varphi}{d\tau} \quad (4)$$

Otrzymana zależność, zgodnie z oczekiwaniami, przedstawia równanie umożliwiające analizę mierzonego sygnału na podstawie obserwacji A i φ . Równolegle zwraca uwagę fakt, że dla procesów niskoenergetycznych, gdy możemy zaniedbać zmiany długości wektora i założyć $A \cong \text{const}$, całą informację o zmianach mierzonego sygnału zawiera kąt fazowy:

$$\frac{dz}{d\tau} = -A \sin \varphi \frac{d\varphi}{d\tau} \quad (5)$$

Jest wiadome, że metody bazujące na widmie mocy nie potrafią wykryć zależności fazowych pomiędzy składowymi częstotliwości oraz tłumią informacje fazowe. Zatem konieczne jest poszukiwanie miar widmowych wyższych rzędów, np. miar bispektralnych, w celu wykrycia różnych postaci sprzężeń fazowych pomiędzy składowymi częstotliwościami. W celu zbadania tego problemu zapiszmy wzór na bispektrum w postaci: [6, 7]:

$$B(f_x, f_y) = E[S(f_x)S(f_y)S^*(f_x + f_y)] \quad (6)$$

Łatwo zauważyć, że bispektrum jest w postaci zespolonej oraz, że wartości bispektrum zależą od dwóch częstotliwości f_x and f_y . Zapisując równa-

nie (6) w postaci składowych amplitudy i fazy otrzymamy:

$$B(f_x, f_y) = |S(f_x)||S(f_y)||S(f_x + f_y)|e^{j\Theta_\beta(f_x, f_y)} \quad (7)$$

gdzie $\Theta_\beta(f_x, f_y) = \Theta(f_x) + \Theta(f_y) - \Theta(f_x + f_y)$ jest nazywane bifazą.

Wykorzystując algorytm szybkiej transformaty Fouriera (FFT) możliwe jest obliczenie bispektrum wierszowego:

$$B_i(f_x, f_y) = S_i(f_x)S_i(f_y)S_i^*(f_x + f_y) \quad (8)$$

Bispektrum to może być estymowane przez wewnętrzny trójkątny obszar $0 \leq f_y \leq f_x, f_x + f_y = f_\mu / 2$. Wystarcza to do pełnego opisu bispektrum jako, że z powodu symetrii bispektrum w płaszczyźnie $f_x - f_y$, cała istotna informacja zawiera się w obszarze podstawowym składającym się z wewnętrznych i zewnętrznych trójkątów [7].

W odróżnieniu od bispektrum wierszowego, bispektrum diagonalne jest zdefiniowane jako:

$$B(f, f) = E[S(f)S(f)S^*(2f)] \quad (9)$$

w którym $f_x = f_y = f$.

Bispektrum diagonalne jest bardzo pomocne w wykrywaniu efektów nieliniowych.

Prezentowana metoda została sprawdzona podczas eksperymentu diagnostycznego, gdzie był badany silnik o zapłonie samoczynnym.

3. Eksperyment

Obiektem badań był dotarty, rzędowy, sześciocylinnowy, wolnossący silnik o zapłonie samoczynnym typu S359 [8].

W trakcie realizacji pracy zastosowano eksperyment czynny, podczas którego zmieniano parametry stanu technicznego bez demontażu silnika lub z demontażem pewnych elementów, nie zaburzającym jednak głównej struktury silnika. Ograniczono się do zmiany trzech parametrów regulacyjnych: kąta wyprzedzenia wtrysku, dawki paliwa do jednego cylindra i zmiany ciśnienia wtrysku w jednym wtryskiwaczu [9].

Zmianę kąta wyprzedzenia wtrysku realizowano poprzez odpowiednie obracanie wałka pompy wtryskowej względem wałka sprzęgła pompy wtryskowej. Ustawiano jedną z dwu wartości kąta wyprzedzenia wtrysku: wartość nominalną ($18,5^\circ$) lub wartość zmniejszoną (8°).

Zmianę dawki paliwa realizowano dla wybranej (drugiej) sekcji tłoczącej poprzez całkowite odłączenie wtryskiwacza od sekcji tłoczącej. Ustawiano więc jedną z dwu wartości dawki: wartość nominalną lub zerową w całym zakresie prędkości obrotowych wału korbowego.

Zmianę ciśnienia wtrysku realizowano dla jednego wtryskiwacza, zasilającego wybrany (drugi)

cylinder silnika, poprzez zmianę napięcia sprężyny dociskowej iglicy. Ustawiano jedną z dwu wartości ciśnienia wtrysku: wartość nominalną (21,5 MPa) lub zmniejszoną (10 MPa). W wyniku uzyskano dziewięć symulowanych stanów technicznych silnika opisanych w Tab. 1.

Tabela 1. Symulowane stany techniczne

Lp.	Opis stanu technicznego
1	Silnik bez uszkodzeń (wyjściowe ustawienie nominalnych wartości parametrów regulacyjnych)
2	Odłączony wtryskiwacz
3	Zmniejszone ciśnienie wtrysku
4	Zmniejszone ciśnienie wtrysku, odłączony wtryskiwacz
5	Zmniejszony kąt wyprzedzenia wtrysku
6	Zmniejszony kąt wyprzedzenia wtrysku, odłączony wtryskiwacz
7	Zmniejszony kąt wyprzedzenia wtrysku, zmniejszone ciśnienie wtrysku
8	Zmniejszony kąt wyprzedzenia wtrysku, zmniejszone ciśnienie wtrysku, odłączony wtryskiwacz
9	Silnik bez uszkodzeń (ponowne ustawienie nominalnych wartości parametrów regulacyjnych)

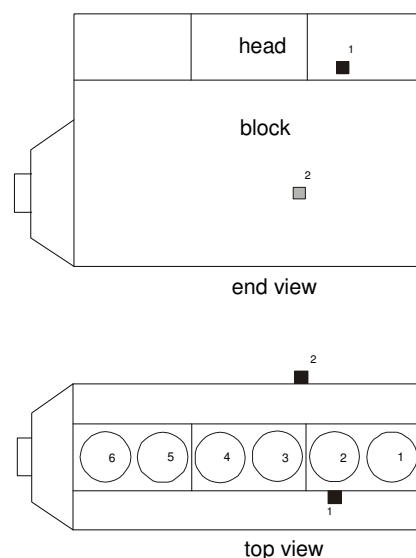
Ze względu na to, że uzyskane wyniki badań miały potencjalnie służyć budowie nowej metody diagnozowania silnika, zdecydowano się na prowadzenie badań przy prędkościach obrotowych możliwych do osiągnięcia podczas diagnozowania eksploatacyjnego pojazdów w warunkach braku zewnętrznego obciążenia, to jest biegu jałowego i maksymalnej regulowanej. Ustalenie braku obciążenia wynikało z faktu, że stosowanie stałych i ściśle określonych obciążeń układu napędowego samochodu podczas badań diagnostycznych wymaga wyposażenia stacji diagnostycznej w hamownię podwoziową, co jest rzadkością. Ustalenie takich warunków pracy było spowodowane też tym, że przy stosowanych w badanym silniku dwuzakresowych regulatorach prędkości obrotowej nie jest możliwe ustalenie, w warunkach braku zewnętrznego obciążenia silnika, pośrednich prędkości obrotowych. Fabryczne nastawy regulacyjne pomp wtryskowych zapewniają utrzymywanie przez silnik wartości prędkości obrotowej biegu jałowego w zakresie 500÷650 obr/min oraz wartości maksymalnej regulowanej prędkości obrotowej na poziomie ok. 3100 obr/min [8].

Pomiary sygnałów drganiowych wykonano na silniku rozgrzanym do temperatur eksploatacyjnych.

Jako miejsca rejestracji sygnałów drganiowych wybrano nadlew technologiczny w osi wału korbowego po prawej stronie silnika oraz płaską powierzchnię głowicy w osi drugiego cylindra tuż

przy połączeniu głowicy z kadłubem po lewej stronie silnika [9]. Miejsca te, położone blisko miejsc generacji większości sygnałów drganiowych w tym silniku, schematycznie pokazano na Rys. 1. Czujniki drgań mocowano za pomocą połączeń gwintowanych wykonanych w obrębie tych płaskich powierzchni.

Rejestracji sygnałów wibroakustycznych – przebiegów czasowych przyspieszeń drgań prostopadłych do powierzchni montażu czujników, dokonywano za pomocą piezoelektrycznych ładunkowych czujników drgań typu B&K 4384 jednocześnie w obu punktach pomiarowych. [10].



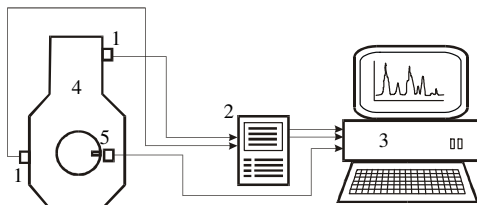
Rys. 1. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na silniku

1 – punkt mocowania czujnika na głowicy silnika,
2 – punkt mocowania czujnika na kadłubie silnika,

$\textcircled{1} \div \textcircled{6}$ – cylindry silnika

Otrzymane sygnały ładunkowe były przetwarzane na sygnały napięciowe i wzmacniane we wzmacniaczu ładunku typu B&K NEXUS. Rejestracji sygnału strobującego dokonywano za pomocą czujnika fotoelektrycznego produkcji Zakładu Elektroniki Pomiarowej Wielkości Nielektrycznych. Wszystkie sygnały rejestrowano i analizowano za pomocą układu analityczno-pomiarowego typu Roadrunner firmy Skalar Instruments. Sygnały rejestrowano przez 5 s (czas ponad 2-krotnie dłuższy od czasu trwania 20 obrotów wału korbowego silnika pracującego z prędkością biegu jałowego i ponad 12-krotnie dłuższy od czasu trwania 20 obrotów wału korbowego silnika pracującego z prędkością maksymalną regulowaną – ilości obrotów przyjętej do uśredniania synchronicznego), próbując je z częstotliwością 10 kHz. Na ich podstawie wyznaczono dyskretne widma amplitudowo-częstotliwościowe przyspieszeń drgań uśrednionych synchronicznie w zakresie 0÷2000 Hz z rozdzielczością około 0,04 Hz (dzięki 250-krotnemu

powielaniu otrzymanych uśrednionych przebiegów czasowych sygnałów drganiowych dla biegu jałowego i 1250-krotnemu powielaniu otrzymanych uśrednionych przebiegów czasowych sygnałów drganiowych dla prędkości maksymalnej regulowanej, dającemu ok. 25-cio sekundowe przebiegi czasowe tego sygnału), zależnie od przyjętego czasu trwania jednego obrotu wału korbowego badanego silnika. Konfigurację układu pomiarowego przed-stawiono schematycznie na Rys. 2.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego
1 – czujniki przyspieszeń drgań B&K 4384,
2 – wzmacniacz ładunku B&K NEXUS,
3 – układ pomiarowo-analityczny Skalar Instruments „Roadrunner”, 4 – silnik,
5 – czujnik prędkości obrotowej wału korbowego silnika

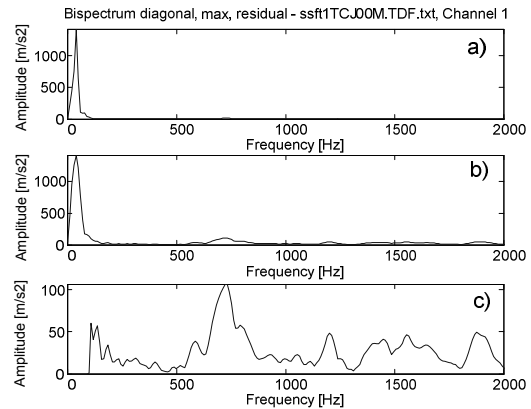
4. Analiza wyników eksperymentów

W pierwszym kroku sygnał wibroakustyczny z kanału nr 1 (Rys. 1) był synchronizowany do jednego obrotu wału korbowego (w celu wyeliminowania częstotliwości obrotowej i powiązanych z nią zaburzeń) – dla prędkości biegu jałowego. Dla maksymalnej regulowanej prędkości obrotowej sygnał wibroakustyczny z kanału nr 1 był różnie synchronizowany ale tym razem do pięciu obrotów wału korbowego (w celu utrzymania rozdzielczości częstotliwościowej). W kolejnym kroku wyniki przetwarzano (poprzez bispektrum, na płaszczyznę częstotliwość-częstotliwość i obliczano diagonalne (Rys. 3a, 4a) oraz maksymalne bispektrum (Rys. 3b, 4b) w celu zbudowania miar bispektralnych [11] w funkcji symulowanych uszkodzeń silnika. Kolejnym krokiem było stworzenie nowej miary, która jest w stanie dużo lepiej diagnozować stan silnika. Zostały obliczone całki z kolejnych pomiarów, z wykresów bispektrum maksymalnego obliczonego na podstawie macierzy trójkątnej – bispektrum residualnego (Rys. 3c, 4c), powstałego na skutek wycięcia z macierzy bispektralnej głównej diagonalnej, a opisującego wpływ zjawisk modulacyjnych i efektów nieliniowych.

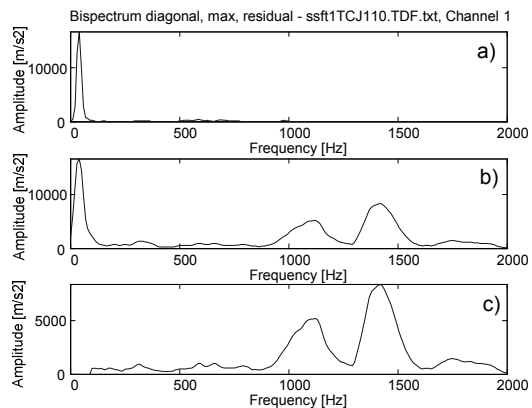
Następnie zostały obliczone całki z szumu bispektralnego obliczonego na podstawie wykresów amplitud maksymalnych bispektrum residualnego z poziomem odcięcia 500 [m/s²] – dla prędkości biegu jałowego (wszystko co miało wartość wyższą od tego poziomu było do niego równane) dla dzie-
więciu stanów technicznych silnika (Rys. 5).

Te same miary zostały obliczone dla maksymalnej regulowanej prędkości obrotowej (Rys. 6, 7).

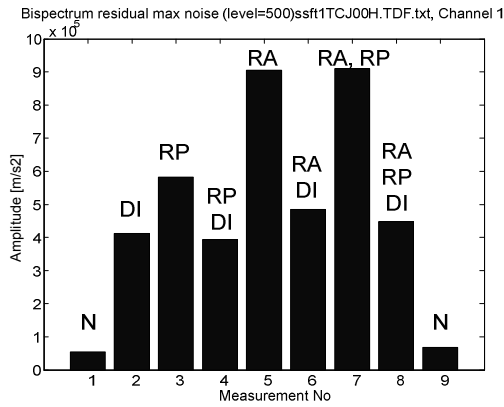
Całki z szumu bispektralnego obliczonego na podstawie wykresów amplitud maksymalnych bispektrum residualnego (dla maksymalnej regulowanej prędkości obrotowej) z poziomem odcięcia 5000 [m/s²] (Rys. 8).



Rys. 3. Miary bispektralne obliczone dla prędkości biegu jałowego, silnik bez uszkodzeń:
a) bispektrum diagonalne, b) bispektrum maksymalne, c) bispektrum residualne

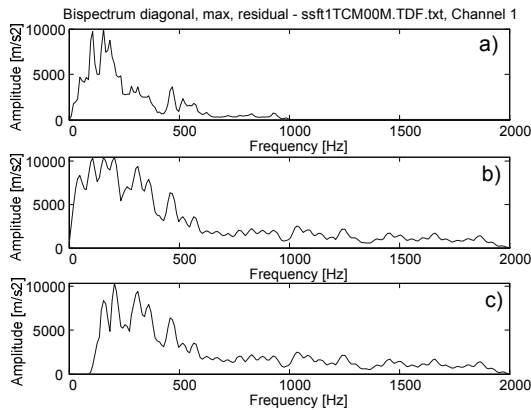


Rys. 4. Miary bispektralne obliczone dla prędkości biegu jałowego, zmniejszony kąt wyprzedzenia wtrysku, zmniejszone ciśnienie wtrysku:
a) bispektrum diagonalne, b) bispektrum maksymalne, c) bispektrum residualne

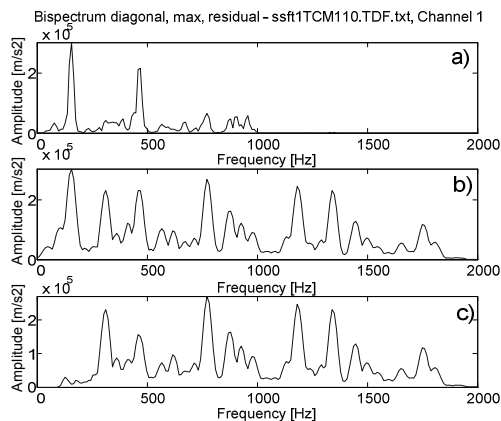


Rys. 5. Całki z szumu bispektralnego obliczonego na podstawie wykresów amplitud maksymalnych bispektrum residualnego dla prędkości biegu jałowego, dziewięć stanów technicznych:

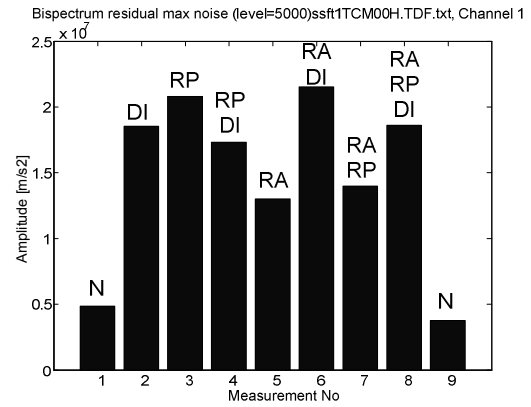
- N – stan nominalny (silnik bez uszkodzeń),
- DI – odłączony wtryskiwacz,
- RP – zmniejszone ciśnienie wtrysku,
- RA – zmniejszony kąt wyprzedzenia wtrysku



Rys. 6. Miary bispektralne obliczone dla maksymalnej regulowanej prędkości obrotowej, silnik bez uszkodzeń: a) bispektrum diagonalne, b) bispektrum maksymalne, c) bispektrum residualne



Rys. 7. Miary bispektralne obliczone dla maksymalnej regulowanej prędkości obrotowej, zmniejszony kąt wyprzedzenia wtrysku, zmniejszone ciśnienie wtrysku: a) bispektrum diagonalne, b) bispektrum maksymalne, c) bispektrum residualne



Rys. 8. Całki z szumu bispektralnego obliczonego na podstawie wykresów amplitud maksymalnych bispektrum residualnego dla maksymalnej regulowanej prędkości obrotowej, dziewięć stanów technicznych: N – stan nominalny (silnik bez uszkodzeń), DI – odłączony wtryskiwacz, RP – zmniejszone ciśnienie wtrysku, RA – zmniejszony kąt wyprzedzenia wtrysku

Dla prędkości biegu jałowego możemy zobaczyć, na rysunku 5, że możliwe jest rozpoznanie czterech stanów technicznych silnika:

5. silnik bez uszkodzeń (N) poziom powyżej $1 \cdot 10^5$ [m/s²];
6. silnik z odłączonym wtryskiwaczem – DI (z lub bez innych uszkodzeń – RA, RP) – poziom $4 \div 4.5 \cdot 10^5$ [m/s²];
7. silnik ze zmniejszonym ciśnieniem wtrysku (RP) – poziom około $6 \cdot 10^5$ [m/s²];
8. silnik ze zmniejszonym kątem wyprzedzenia wtrysku – RA (z lub bez zmniejszonego ciśnienia wtrysku RP) – poziom powyżej $9 \cdot 10^5$ [m/s²];

Niestety dla maksymalnej regulowanej prędkości obrotowej (Rys. 8), możemy rozpoznać jedynie trzy stany techniczne silnika, lecz ostatni błędnie:

4. silnik bez uszkodzeń (N) poziom powyżej $0.5 \cdot 10^7$ [m/s²];
5. silnik ze zmniejszonym kątem wyprzedzenia wtrysku – RA (z lub bez zmniejszonego ciśnienia wtrysku RP) – poziom $1.2 \div 1.5 \cdot 10^7$ [m/s²];
6. silnik z odłączonym wtryskiwaczem – DI (z lub bez innych uszkodzeń – RA, RP) – poziom powyżej $1.6 \cdot 10^7$ [m/s²], ale nie rozpoznany jest silnik ze zmniejszonym ciśnieniem wtrysku (RP) – poziom około $2.1 \cdot 10^5$ [m/s²];

Widać, że możliwe jest zbudowanie skutecznego i czułego parametru diagnostycznego badającego zmiany jakościowe stanu technicznego silnika tylko dla prędkości biegu jałowego. Dla maksymalnej regulowanej prędkości obrotowej zaszumienie sygnału i zaburzenia są zbyt duże aby zbudować skuteczny i czuły parametr diagnostyczny

5. Wnioski

Referat pokazał, że możliwe jest diagnozowanie zmian stanu obiektu z wykorzystaniem technik wibroakustycznych uwzględniających niewielką dyssypację energii. Prezentowana metoda nie tylko właściwie wyjaśnia i definiuje zjawisko z jakościowego punktu widzenia, ale także zmiany ilościowe, które wykazują się dla zadanych warunków w pełni zadowalające.

Ważną praktyczną korzyścią prezentowanej metody, jest to, że umożliwia ona diagnozę obiektu,

bez konieczności projektowania szczegółowych modeli zmiany stanu obiektu. Każdy może korzystać z zalet miar bispektralnych, które są nie tylko bardzo czułe na zmiany struktury częstotliwościowej sygnału wibroakustycznego, ale także są czułe na zmiany rodzaju nieliniowości i sprzężenia fazowego powiązanego z analizowanym zjawiskiem.

Analiza zmian szumu bispektralnego może być użytecznym i czułym parametrem diagnostycznym zmian jakościowych stanu technicznego silnika.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

SI/ZS Self-Ignition/Zapłon Samoczynny

Bibliography/Literatura

- [1] IPM WAT TEAM: Final verification of realization of a research work entitled "Experimental examination of vehicles manufactured by FSC - Starachowice. Results of operational reliability tests of STAR-200 trucks from a trial series. WAT, Warsaw, 1980.
- [2] Mączak J., Local meshing plane as a source of diagnostic information for monitoring the evolution of gear faults. *Engineering Asset Lifecycle Management*, t. 19, D. Kiritsis, C. Emmanouilidis, A. Koronios, i J. Mathew, Ed. London: Springer London, 2010, pp. 661-670.
- [3] Mączak J., Szczurowski K., Research into the influence of environmental conditions on the dynamic response of the prestressed concrete structures. *Institute of Vehicles Scientific Papers*, No 5(81), 2010, pp. 111÷118 (in Polish).
- [4] Dybała J., Use of task-oriented dynamic re-sampling in reduction of signal non-stationarity. *Diagnostyka*, Vol. 48, No 4, 2008, pp. 25÷30.
- [5] Radkowski S., Gumiński R., Spectrum width factor as a diagnostic parameter determining the degree of damage of tooth surface. *Diagnostyka*, Vol. 53, No 1, 2010, pp. 55÷60.
- [6] Radkowski S., Smalko Z., Pięta A., Worpay M.: Use of Bispectral Analysis In Condition Monitoring of Machinery. *Proceedings of Third European Workshop Structural Health Monitoring*, 2006, pp. 627–634.
- [7] Yang W., Towards Dynamic Model-Based Prognostics for Transmission Gears, *SPIE Conference Proceedings*, Vol. 4733, 2001, pp. 157–167.
- [6] Kocia B., Kukliński Z., Łukowski Z., Pałacha R., Zapłowski W.: Construction and repair of STAR 266 and related trucks. *WPM „WEMA”*, Warszawa 1988 (in Polish).
- [9] Boruta G.: Analysis of diagnostic information contained in vibroacoustic signal with the regulated parameters of a piston-type combustion engine Ph.D. thesis, Poznań University of Technology, 2006 (in Polish).
- [10] Boruta G., Jasiński M.: The Multidimensional Diesel Engine Diagnosis Based on the Vibroacoustic signal spectrum analysis. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 15, No. 4, 2008, pp. 63÷72.
- [11] Jasinski M., Radkowski S.: Use of the higher spectra in the low-amplitude fatigue testing. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 25, 2011, pp. 704–716. doi:10.1016/j.ymssp.2010.06.001

Mr Grzegorz Boruta, DSc., – assistant professor in the Mechatronics Chair at University of Warmia and Mazury.

Dr inż. Grzegorz Boruta – adiunkt w Katedrze Mechatroniki Uniwersytetu Warmińskiego-Mazurskiego.



Mr Marcin Jasiński, DSc., – assistant professor in the Institute of Vehicles at Warsaw University of Technology.

Dr inż. Marcin Jasiński – adiunkt w Instytucie Pojazdów Politechniki Warszawskiej.

