

Diagnostics of work process course in cylinders of marine reciprocating internal combustion engines using vibration signal

Abstract: In this paper are presented a research results an applications of an acceleration vibration signals to diagnosis of the work cycle of medium speed compression ignition engines. This paper presents the research results of the relationship between the course in-cylinder pressure and vibration signal registered at the head of the combustion engine.

The investigations have been carried in operating conditions of the medium-speed marine diesel engines propelled a generator. In preliminary studies have been conditions planned of essential investigations for a variety of mounting vibration acceleration sensor. There examined the influence of the load on the values for the applied diagnostic parameters. Research carried out for the different operating conditions.

In fundamental investigations an influence of the technical state on values of diagnostic parameters was tested as well and failures was localised. Diagnostic symptoms in time, amplitude and frequency domain bounded with the technical state were selected and compared them with other diagnostic symptoms. Detected injectors failures and the primary damage of valves head using the boundary values.

Keywords: *marine engines, work process, diagnostics, vibration signals*

Diagnozowanie przebiegu procesu roboczego w cylindrach okrętowych silników spalinowych z wykorzystaniem sygnału drganiowego

Streszczenie: W artykule przedstawiono metodę wykorzystania diagnostyki sygnału przyspieszeń drgań do oceny obiegu procesu roboczego w tłokowym silniku spalinowym o zapłonie samoczynnym. W pracy przedstawiono wyniki badań związku między przebiegiem ciśnienia w cylindrze a sygnałem drganiowym rejestrowanym na głowicy silnika spalinowego.

Badania przeprowadzono w warunkach eksploatacji średnioobrotowych okrętowych silników z zapłonem samoczynnym napędzających prądnice. W badaniach wstępnych planowano warunki badań zasadniczych dla różnych mocowań czujnika przyspieszeń drgań. Sprawdzano wpływ obciążenia na wartości wykorzystywanych parametrów diagnostycznych. Badania realizowano w różnych warunkach eksploatacyjnych.

W badaniach zasadniczych sprawdzano wpływ stanu technicznego na wartości parametrów diagnostycznych oraz lokalizowano uszkodzenia. Wyselekcjonowano symptomy diagnostyczne w dziedzinie czasu, amplitudy i częstotliwości związane ze stanem technicznym oraz porównano je z innymi symptomami diagnostycznymi. Wykryto uszkodzenia wtryskiwaczy oraz pierwotne zaworów głowicy za pomocą wartości granicznych.

Słowa kluczowe: *silniki okrętowe, proces roboczy, diagnostyka, sygnały drganiowe*

1. Wstęp

Przebieg ciśnienia w cylindrze jest podstawowym procesem roboczym tłokowego silnika spalinowego. Od jakości tego procesu zależy efektywność eksploatacji określona zużyciem paliwa, sprawnością i emisją toksycznych składników spalin. Zależy to od przygotowania mieszanki palnej i przebiegu procesu spalania. Oba uwarunkowania wskazują na konieczność opracowania skutecznych metod sterowania przebiegiem pierwotnego procesu silnikowego, jakim jest spalanie paliwa w cylindrze, a także opracowania metod oceny tego procesu.

Do oceny procesu spalania wykorzystuje się wartości temperatur spalin wylotowych z poszczególnych cylindrów. Często linia aproksymacji zmian temperatury spalin wylotowych odchyła się tylko nieznacznie przy zmianie stanu technicznego, podczas gdy z powodu uszkodzonego wtryskiwacza

wypaleniu może ulec denko tłoka. Podobnie trudno do rozpoznania są nieszczelności komór spalania.

Niektóre uszkodzenia, takie jak: narastające zużycie gniazd zaworowych i przylgni zaworów, przesunięcie faz rozrządu, zużycie gładzi cylindrowej, nawet ponad wymiary dopuszczalne dla danego silnika, w wielu przypadkach potwierdzonych w praktyce, nie sygnalizują alarmu systemy diagnostyczne. Uszkodzenia mechaniczne oraz zużycie eksploatacyjne, szczególnie we wczesnych fazach rozwoju, są kompensowane przez adaptacyjne systemy regulacji, wskutek przyjętych dopuszczalnych zakresów regulacji [7]. Dopiero po wystąpieniu większego uszkodzenia przebieg procesu regulacji jest tak bardzo zakłócony, że znalezienie niezdatności jest stosunkowo łatwe, ponieważ system przedstawia się na pracę w trybie niezdatności lub niezdatności częściowej.

Diagnostyka przebiegu ciśnienia w cylindrach silników okrętowych wykorzystuje ich rejestrację

i analizę, lecz wytwarzane są silniki niewyposażone w zawory indykatorowe. Pomiar ciśnienia w cylindrach silników wyposażonych w zawory indykatorowe obarczone są jednak dużymi błędami, a zawory indykatorowe są często niezdatne.

Jednym ze sposobów pozyskiwania informacji diagnostycznej jest pomiar drgań generowanych przez tłokowy silnik spalinowy. Dlatego podjęto próbę diagnozowania tłokowych silników spalinowych z wykorzystaniem sygnałów drganiowych w różnych kierunkach [2, 6, 10, 12], drgań skrętnych wału korbowego [1], jednoczesnego pomiaru sygnałów ciśnienia w komorze spalania i drgań [2, 5, 9] oraz drgań i hałasu [3]. Prowadzono badania silników badawczych jednocylindrowych [2, 8], silników kolejowych [10, 8] lub okrętowych [4, 6, 9, 10]. Analizę prowadzono w dziedzinie czasu, amplitudy, częstotliwości, czasowo-częstotliwościową i kąto-częstotliwościową [7].

2. Metoda badań

Silnik spalinowy jest obiektem podlegającym oddziaływaniu wymuszeń wewnętrznych i zewnętrznych. Jednym z wymuszeń wewnętrznych są siły gazowe pochodzące od przebiegu procesu roboczego w cylindrze, które badano.

Badaniami objęto różne typy średnioobrotowych silników okrętowych napędzające prądnice, a w tej pracy głównie wytworzone na licencji firmy MAN B&W typu 6 i 7L16/24 [9]. Silniki te nie są wyposażone w zawory indykatorowe, a posiadają system monitorowania temperatur spalin wylotowych [11]. Wykorzystano, zatem sygnały przyspieszeń drgań do diagnozowania przebiegu obiegu roboczego.

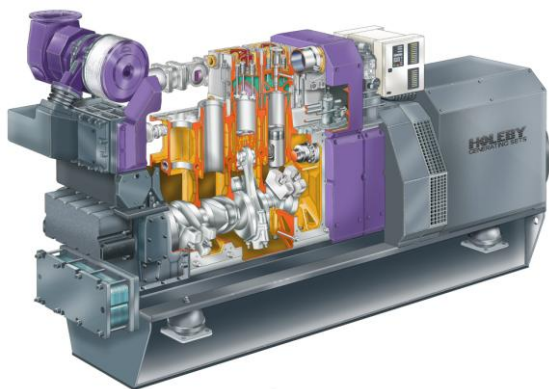


Fig. 1. View and partial cross-sectional of the engine MAN B & W L16/24 type [11]

Rys. 1. Widok i częściowy przekrój silnika MAN B&W typu L16/24 [11]

Wykonano również badania silników wyposażonych w zawory indykatorowe. Na rys. 2 przedstawiono przebieg czasowy sygnału przyspieszeń drgań dla jednego cylindra oraz położenia górnego martwego położenia tłoka (GMP), przetwarzane za pomocą czujnika fotooptycznego. Selekcja czasowa

pozwołała wyróżnić impulsy pochodzące od procesu spalania, wtrysku paliwa i funkcjonowania zaworów w głowicy.

W pracy podjęto próbę znalezienia związków między przebiegiem ciśnienia w komorze spalania a przebiegiem przyspieszeń drgań przetwarzanych na głowicy cylindrowej:

$$a = f(P_s) \quad (1)$$

gdzie: a – sygnał przyspieszeń drgań,
 P_s – ciśnienie w cylindrze

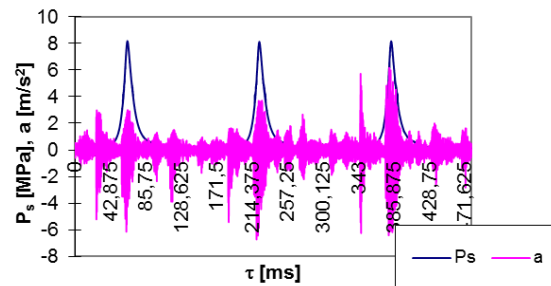


Fig. 2. Time courses of signals: in-cylinder pressure of marine engine and accelerations vibration: τ – time

Rys. 2. Przebiegi czasowe sygnałów: ciśnienia czynnika w cylindrze silnika okrętowego i przyspieszeń drgań: τ – czas

Na rys. 2 widać, które impulsy przebiegu czasowego przyspieszeń drgań odpowiadają wzrostowi ciśnienia w cylindrze silnika.

Silniki poddano badaniom w warunkach eksploatacji wielokrotnie, w różnych stanach technicznych: przed obsługą, po obsłudze, przed i po uszkodzeniu oraz w czasie prób odbiorczych. Widok badanych silników oraz elementów układu pomiarowego przedstawiono na rys. 3.

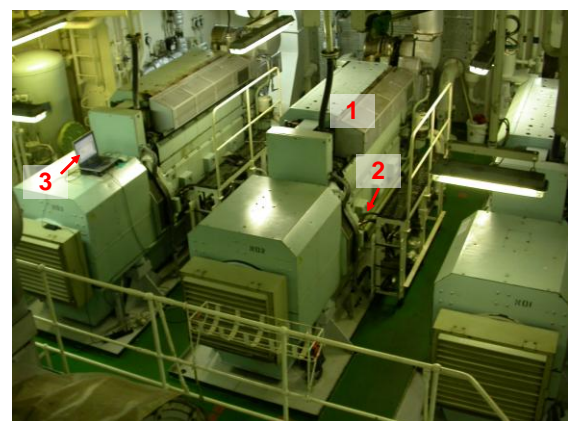


Fig. 3. The engines and measuring circuit elements: 1 – auxiliary test engine, 2 – crankshaft position sensor, 3 – computer

Rys. 3. Silniki oraz elementy toru pomiarowego: 1 – badany silnik pomocniczy, 2 – czujnik położenia wału korbowego, 3 – komputer

Analizę sygnałów pomiarowych prowadzono w dziedzinie czasu, amplitudy i częstotliwości, poszukując pasm częstotliwości analizy i symptomów diagnostycznych o największej przydatności.

3. Wyniki badań wstępnych

Dla wyboru racjonalnego miejsca odbioru sygnałów zastosowano planowanie eksperymentu, w którym sprawdzano wpływ sposobu i miejsca mocowania czujnika pomiarowego na wartości parametrów diagnostycznych [9]. Badano także wpływ pasma częstotliwości analizy oraz dokonano selekcji czasowej sygnału. Na rys. 4 przedstawiono przebieg czasowy sygnału przyspieszeń drgań, przy czujniku zamocowanym magnetycznie.

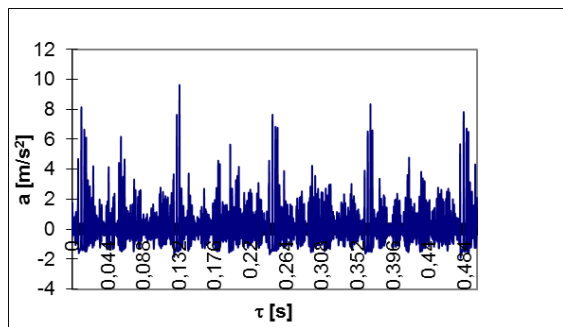


Fig. 4. Time course of vibration acceleration signals in the frequency range 0-2500 Hz

Rys. 4. Przebieg czasowy sygnału przyspieszeń drgań w paśmie częstotliwości 0–2500 Hz

Z rysunków 2 i 4 wynika, że sygnały przyspieszeń drgań są bardzo zakłócone. Dlatego w dalszych badaniach zastosowano inne mocowania czujnika, filtrowanie (rys. 5) oraz selekcję czasową i kątową (rys. 6). Tak wyselekcjonowane sygnały odznaczały się małym poziomem zakłóceń oraz powtarzalnością.

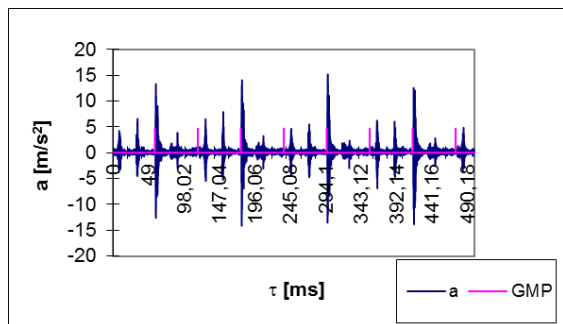


Fig. 5. Time course of acceleration vibration signal delivered on the screw fixing the cylinder head cover of marine engine together with the top dead centre positions GMP

Rys. 5. Przebieg czasowy sygnału przyspieszeń drgań odbierany na śrubie mocującej pokrywę głowicy silnika okrętowego wraz z położeniami górnego martwego punktu GMP

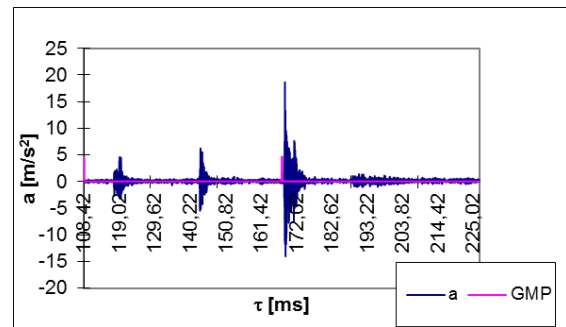


Fig. 6. Selected fragment of time course of vibration acceleration signals in the vicinity of the top dead center

Rys. 6. Wyselekcjonowany fragment przebiegu czasowego sygnału przyspieszeń drgań w okolicach górnego martwego położenia

Do analizy sygnałów w dziedzinie częstotliwości zastosowano między innymi estymaty amplitudowe. Wzory na te globalne miary są następujące:

– wartość skuteczna:

$$\tilde{a}(\theta) = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a^2(\tau, \theta) d\tau \right]^{1/2} = a_{rms}(\theta) \quad (2)$$

– wartość średnia:

$$\bar{a}(\theta) = \frac{1}{T} \int_0^T |a(\tau, \theta)| d\tau = a_{aver}(\theta) \quad (3)$$

– wartość szczytowa dodatnia:

$$\hat{a}(\theta) = \max[+a(\tau, \theta)] = a_{peak}(\theta) \quad (4)$$

dla $0 \leq \tau \leq T$ gdzie:

τ – czas dynamiczny,

T – czas obserwacji,

θ – czas istnienia obiektu.

W badaniach wstępnych sprawdzano również wpływ obciążenia na wartości symptomów diagnostycznych, dla 2 stałych prędkości obrotowych (rys. 7). Do aproksymacji zależności nieliniowej zastosowano wielomian drugiego rzędu.

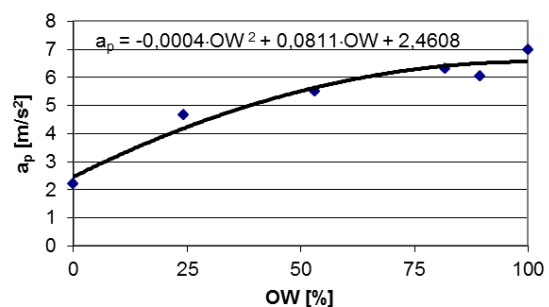


Fig. 7. Influence of relative engine load OW on peak values accelerations vibration signals a_p

Rys. 7. Wpływ obciążenia względnego silnika OW na wartości szczytowe sygnałów przyspieszeń drgań a_p

4. Przykładowe wyniki badań zasadniczych

W badaniach zasadniczych dążono do oceny stanu technicznego poszczególnych cylindrów badanych silników przy tym samym obciążeniu. Na rys. 8 przedstawiono wartości skuteczne przyspieszeń drgań, współzależne z maksymalnym ciśnieniem spalania, z poszczególnych cylindrów. Dla otrzymanych estymat amplitudowych wyznaczono wartości graniczne z prawdopodobieństwem 99,7% z zależności:

$$a_{d_{wg}} = a_{sr} - 3\sigma_s \quad (5)$$

$$a_{g_{wg}} = a_{sr} + 3\sigma_s \quad (6)$$

gdzie: $a_{d_{wg}}$ – dolna wartość graniczna parametru diagnostycznego,

$a_{g_{wg}}$ – górna wartość graniczna parametru diagnostycznego,

a_{sr} – wartość średnia parametru diagnostycznego,

σ_s – błąd średni kwadratowy średniej arytmetycznej obliczony z zależności:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (a_i - a_{sr})^2} \quad (7)$$

gdzie: a_i – i-ta wartość parametru diagnostycznego, n – liczba pomiarów.

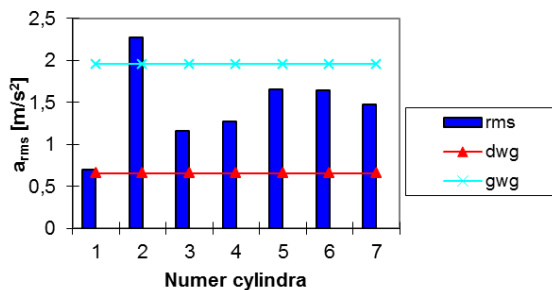


Fig. 7. Root-mean-square values of acceleration vibration signals a_{rms} in each cylinders with the boundary values

Rys. 7. Wartości skuteczne przyspieszeń drgań a_{rms} w poszczególnych cylindrach wraz z wartościami granicznymi

Z rys. 7 wynika, że estymaty amplitudowe sygnału przyspieszeń drgań były zróżnicowane, a dla cylindra nr 1 były na poziomie dolnych wartości granicznych oraz przekroczyły górną wartość graniczną dla cylindra nr 2. Po zatrzymaniu silnika i ponownym uruchomieniu doszło do uszkodzenia elementów zespołu cylindrowego nr 1 wskutek kolizji tłoka z zaworem (rys. 8 i 9). Nastąpiło urwanie 3 trzonów zaworowych, czwarty zawór wbił się w tłok, uszkodzenie tłoka i głowicy oraz tulei cylindrowej. Przyczyną zdarzenia niepożąda-

nego były duże opory trzonka zaworu w przewodnicy.

Poszukując przydatnych metod analizy sygnałów posłużono się między innymi analizą falkową. Rozwój analizy falkowej rozpoczął się od ciągłej transformacji falkowej (ang. Continuous Wavelet Transform – CWT). Ciągła transformata falkowa sygnału przyspieszeń drgań $a(\tau)$ jest zdefiniowana w dziedzinie czasu i częstotliwości:

$$CWT_a^T = \frac{1}{\sqrt{|\alpha|}} \int_{-\infty}^{+\infty} a(\tau) \psi^* \left(\frac{\tau-t}{\alpha} \right) d\tau \quad (8)$$

$$CWT_a^F(t, \alpha) = \frac{1}{\sqrt{|\alpha|}} \int_{-\infty}^{+\infty} a(f) \Gamma^*(\alpha f) e^{j2\pi ft} df \quad (9)$$

$\alpha, t \in \mathbb{R}; \alpha \neq 0$

gdzie: α – parametr skalujący,

t – przesunięcie falki w dziedzinie czasu,

$*$ – sprzężenie zespolone,

f – częstotliwość,

$\psi(\tau)$ – jest dopuszczalną falką podstawową,

$\Gamma^*(\alpha f)$ – przeskalowane widmo falki.

Umożliwiło to zastosowanie reprezentacji czas – skala do badania analogowych sygnałów, gdzie skala spełnia rolę podobną do częstotliwości w analizie częstotliwościowej. Wyniki ciągłej transformaty falkowej dla cylindra uszkodzonego i w stanie zdalności przedstawiono na rys. 10 i 11. Poziomy skali są dla tych dwóch stanów zróżnicowane.



Fig. 8. The piston failure

Rys. 8. Uszkodzony tłok

Zastosowano także widma falkowe dla badanych silników uzyskane z wyjściowych przebiegów czasowych przyspieszeń drgań po operacji ciągłej transformaty falkowej (rys. 12).

Istotną rolę dla dynamiki przyrostu ciśnienia w cylindrze, a w konsekwencji obciążenia układu korbowo-tłokowego, ma stan podukładu wtryskowego – głównie wtryskiwacza. Różnice wartości symptomów w poszczególnych cylindrach silnika przed planową obsługą okresową przedstawione są na rys. 13.



Fig. 9. Damaged cylinder liner
Rys. 9. Uszkodzona tuleja cylindrowa

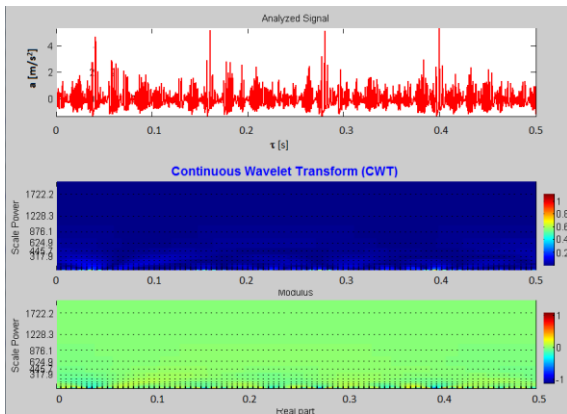


Fig. 10. Continuous wavelet transform for cylinder No. 1 just before the damage
Rys. 10. Ciągła transformata falkowa dla cylindra nr 1 tuż przed uszkodzeniem

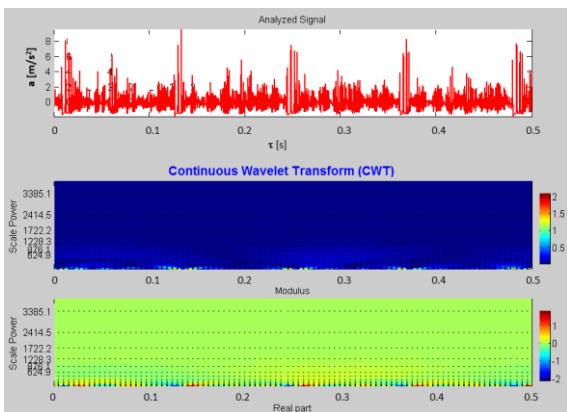


Fig. 11. Continuous wavelet transform for cylinder No. 4 in the up state
Rys. 11. Ciągła transformata falkowa dla cylindra nr 4 w stanie zdatności

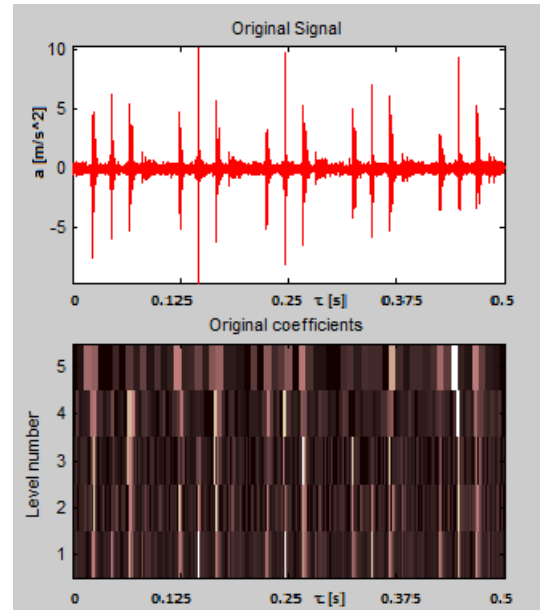


Fig. 12. Wavelet spectrum from time course of vibration acceleration signal
Rys. 12. Widmo falkowe z przebiegu czasowego przyspieszeń drgań

Prezentowane widma umożliwiły pogłówną analizę sygnałów.

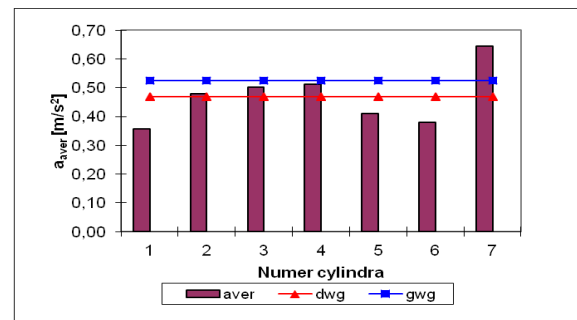


Fig. 13. Mean values of acceleration vibration signals a_{rms} in each cylinders along with boundary values

Rys. 13. Wartości skuteczne przyspieszeń drgań a_{aver} w poszczególnych cylindrach wraz z wartościami granicznymi

Z rys. 13 wynika, że estymaty amplitudowe sygnału przyspieszeń drgań były zróżnicowane, a z cylindrów 1, 5 i 6 o niższych wartościach. Spowodowane były one stanem aparatury wtryskowej, który oceniono również z zastosowaniem wartości średnich przyspieszeń drgań.

Po demontażu wtryskiwaczy w czasie obsługi okresowej stwierdzono połamane sprężyny w 3 wtryskiwaczach, odłamany fragment trzpienia iglicy wtryskiwacza oraz złamane czopy iglic dwóch rozpylaczy (rys. 14 i 15). Złamania sprężyn nastąpiły na dwóch ostatnich zwojach.



Fig. 14. Broken springs and damaged push rod of fuel injectors

Rys. 14. Polamane sprężyny oraz uszkodzony trzpień wtryskiwaczy



Fig. 15. Broken needle shafts of injector nozzles

Rys. 15. Polamane czopy iglic rozpylaczy wtryskiwaczy

Dalsze badania sprowadzać się będą do wyboru najbardziej przydatnych symptomów diagnostycznych z pośród wielu w różnych dziedzinach.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania eksperymentalne w warunkach eksploatacji wykazały możliwość diagnozowania procesu roboczego spalinowych silników okrętowych, nie posiadających zaworów indykatorowych, z wykorzystaniem sygnału przyspieszeń drgań. Czujniki przyspieszeń drgań dobrze jest mocować na śrubach mocujących głowicę lub pokrywę głowicy za pomocą gwintu.

Wykorzystując selekcję przebiegu czasowego sygnału drganiowego, istnieje możliwość identyfikacji elementarnych procesów, jak otwieranie i zamykanie zaworów dolotowych i wylotowych, wtrysk paliwa oraz przebieg ciśnienia w cylindrze. Symptomy sygnału przyspieszeń drgań zawierają informacje o przebiegu procesu spalania, stanie technicznym grupy tłokowo-cylindrowej, zaworów w głowicy, aparatury wtryskowej itd.

Ciągła transformata falkowa daje możliwość poprawnej diagnozy przy ocenie stanu technicznego istotnych elementów silnika spalinowego oraz wydzielić elementarne procesy ze złożonego sygnału drganiowego. Dokonano weryfikacji ilościowej tej metody – to znaczy ilościowe porównanie z metodami konwencjonalnymi analizy sygnałów.

Zaawansowane metody przetwarzania sygnałów umożliwiają uzyskanie bardzo znacznej liczby miar sygnałów, z których należy wybrać miary najbardziej przydatne do diagnostyki. Dalsze badania sprowadzać się będą do wyboru najbardziej przydatnych symptomów diagnostycznych z pośród wielu w różnych dziedzinach.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

a	Acceleration vibration signal/sygnal przyspieszeń drgań	gwg	Upper boundary value/górna wartość graniczna
aver	Mean value/wartość średnia	rms	Root-mean-square value /wartość skuteczna przebiegu
dwg	Lower boundary value/dolna wartość graniczna	τ	Time/czas
f	Frequency/częstotliwość		
GMP	Top dead centre/górne martwe położenie		

Bibliography/Literatura

- [1] Charles P., Sinha J.K., F. Gu J.K., Lidstone L., Ball A.D.: Detecting the crankshaft torsional vibration of diesel for combustion related diagnosis. *Journal of Sound and Vibration* 2009, № 3–5, pp. 1171–1185.
- [2] Czechyra B., Szymański G., Tomaszewski F.: Odwzorowanie procesu spalania w sygnale drganiowym tłokowego silnika spalinyowego o zapłonie samoczynnym. *Diagnostyka* 2004 vol. 30, t. 1, s. 123–126.
- [3] Drallmeier J.A., Eversman W., McAdams D.: Indication of cylinder pressure rise rate by means of vibration and acoustic emissions of an internal combustion engine. *Missouri University of Science and Technology* 2008, pp. 1–148.

-
- [4] Flekiewicz M., Madej H., Wojna G.: Wykorzystanie selekcji przestrzenno-fazowej (kątowej) sygnału WA w diagnozowaniu złożenia tłok – cylinder silnika ZS. *Journal of KONES Powertrain and Transport* 2007 Vol. 14, No 2, pp 133–144.
- [5] Guo Z., Yuan C, Liu P.: Study on identification model of cylinder liner-piston ring using vibration analysis based on fuzzy c-means clustering. *The Open Mechanical Engineering Journal* 2012 №. pp. 126–132.
- [6] Lus T.: Diagnostics research of high-speed marine diesel engines using envelope vibration method. *Combustion Engines* 20011 nr 3 (146), pp. 83, cd. pp. 1–6.
- [7] Madej H., Łazarz B., Peruń G.: Application of the wavelet transform in SI engine valve fault diagnosis. *Diagnostyka* 2008 nr 4, s. 97–101.
- [8] Merkisz J., Waligórski M.: Ocena diagnostyczna poprawności przebiegu procesu spalania w silnikach ZS w oparciu o wybrane metody analizy sygnału drganiowego. *Combustion Engines* 2009-SC2, pp. 275–284.
- [9] Monieta J.: Diagnostics of course a work process in cylinders of marine internal combustion engines using vibration signal. *Diagnostyka – Applied Structural Health, Usage and Condition Monitoring* 2012 nr 2(62), pp. 37–41.
- [10] Monieta J., Waleriańczyk P.: Diagnozowanie przebiegu ciśnienia w komorach spalania okrętowych silników spalinowych z wykorzystaniem sygnału drganiowego. *Diagnostyka* 2008 nr 2, s. 157–163.
- [11] Power to the world fleet. MAN B&W Diesel A/S. Reg. No. 39 66 13 14, Høleby, Denmark 2000.
- [12] Żółtowski B.: Badanie struktury sygnału wibroakustycznego procesu spalania w silnikach tłokowych. *Silniki Spalinowe* 1980 nr 2, s. 17–19.

Mr Jan Monieta, DEng. – doctor in the Faculty of Mechanical Engineering at Maritime University of Szczecin.

Dr inż. Jan Monieta – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Akademii Morskiej w Szczecinie.

