

The application in-cylinder pressure course in different domains for diagnostics of medium speed marine diesel engines in operation conditions

Abstract: In this work has been presented the results of the the application in-cylinder pressure signal analysis of the marine medium-speed engine to diagnostics. In-cylinder pressure signals analysis has been carried out in amplitude, time and frequency domain as well wavelet analysis for their diagnostics to select a rational method.

There have been carried out preliminary and principal investigations using experiment planning. The preliminary research have been done on marine diesel engines Sulzer type drive generators, occurring in engine rooms of bulk carriers and rely on the measurement of pressure signals in each cylinder and analyzing them under different engine loads and verify their correlation with the load.

In principal research has been diagnosis technical state of individual cylinders at constant loading. Useful diagnostic symptoms have been selected. The method was being verified locating failures of engine elements.

Keywords: piston marine diesel engine, course of combustion pressure, diagnostics, useful symptoms

Zastosowanie analizy przebiegu ciśnienia w cylindrach okrętowych silników spalinowych w różnych dziedzinach do diagnostyki w warunkach eksploatacji

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki zastosowania analizy przebiegu ciśnienia w cylindrach okrętowych średnioobrotowych silników tłokowych w dziedzinie czasu, amplitudy, częstotliwości oraz analizy falkowej do ich diagnozowania w celu wyboru racjonalnej metody.

Przeprowadzono wstępne i zasadnicze badania eksperymentalne z wykorzystaniem metod planowania eksperymentu. Wstępne badania zostały przeprowadzone na okrętowych silnikach Sulzer napędu prądnic, występujących w siłowniach masowców i polegały na pomiarze sygnałów ciśnienia w poszczególnych cylindrach i analizie ich przy różnych obciążeniach silnika oraz sprawdzaniu ich korelacji z obciążeniem.

W badaniach zasadniczych oceniano stan techniczny poszczególnych cylindrów przy stałym obciążeniu. Przydatne symptomy diagnostyczne zostały wyselekcjonowane, a metodę zweryfikowano lokalizując uszkodzenia elementów silnika.

Słowa kluczowe: tłokowe silniki okrętowe, przebieg ciśnienia w cylindrach, diagnostyka, przydatne symptomy

1. Wprowadzenie

Silniki o zapłonie samoczynnym są obecnie głównym źródłem napędów statków morskich, elektrowni oraz środków transportu lądowego. Ustalane są ciągle nowe ograniczenia dotyczące emisji toksycznych składników i zadymienia spalin oraz zużycia paliwa, co wymusza badania i rozwój konstrukcji [2, 6, 14]. Przebieg ciśnienia w komorze spalania pozostaje w związku, z jakością procesu spalania [2].

Od tłokowych silników spalinowych oczekuje się dużej niezawodności dla zapewnienia bezpieczeństwa oraz efektywności dla opłacalności eksploatacji. Poszukuje się skutecznych metod i środków diagnostyki technicznej [1, 5, 12, 13, 14]. Nowoczesne konstrukcje silników okrętowych coraz częściej charakteryzują podzespoły z elektronicznie sterowanym wtryskiem paliwa,

elektronicznie sterowanym kątem czasu pracy, elektronicznie dozowaną ilością oleju smarującego na cylinder itd.

Badania diagnostyczne z wykorzystaniem przebiegu ciśnienia w cylindrze silników o zapłonie samoczynnym prowadzone są od kilkudziesięciu lat. Zakres diagnostycznego wykorzystania komputerowych systemów monitorująco-diagnostycznych niewiele zmienił się jednak w odniesieniu do początkowych zastosowań indykowania [6, 8, 12]. Również nie stwierdza się istotnego rozwoju metod obróbki wykresów indykatorowych w opracowanych analizatorach ciśnień [7, 12].

Wykresy indykatorowe mają nadal podstawowe znaczenie, jako źródło informacji diagnostycznej tłokowych silników okrętowych.

2. Diagnostyka tłokowych silników spalinowych z wykorzystaniem przebiegu ciśnienia w komorze spalania

Obecnie do diagnozowania silników spalinowych z zastosowaniem parametrów obiegu roboczego są stosowane głównie indykatory elektroniczne [6, 11, 12, 14, 16]. Indykatory te pozwalają na pomiary wartości średnich parametrów z dużej liczby obiegów.

W literaturze spotkać można głównie analizy sygnałów ciśnienia czynnika roboczego w dziedzinie kąta obrotu wału korbowego i czasu [6, 11, 12, 16]. W pracy [15] oceniano proces spalania w silniku tłokowym z wykorzystaniem bezwymiarowych estymat sygnału drganiowego, które są proste. Stosowano analizę widmową jedynie do badania hałasu generowanego w czasie realizacji obiegu roboczego w cylindrach silnika [3, 4].

Problemem wykresów indykatorowych jest położenie na nich GMP i ich synchronizacja z podziałką kątową wału korbowego [8, 12]. Ma to wpływ na dokładność wyznaczania średniego ciśnienia indykowanego. Główną przyczyną błędów są opóźnienia powodowane przez kanały gazowe oraz odkształcenia i drgania skrętne wału korbowego. Za położenie GMP przyjmuje się punkt położenia maksymalnego ciśnienia sprężania lub lokalizację miejsca zerowego pierwszej pochodnej przebiegu ciśnienia czynnika roboczego [7, 10]. W silnikach czterosuwowych średnio- i szybkoobrotowych przebiegi ciśnień czynnika roboczego w cylindrach są zakłócone przez długie pośredniczące kanały gazowe i zawory indykatorowe [10]. Zdarza się, że zawory indykatorowe są uszkodzone lub ich konstrukcji silnika nie przewidziano [7, 10], wówczas zastosowano sygnały drganiowe do oceny przebiegu ciśnienia [9]. Uszkodzenia zaworów indykatorowych to: nieszczelność, niedrożność kanałów w wyniku osadów, luźny grzybek zaworu, niewłaściwy stan połączenia stożkowego [7].

Wyznaczane miary diagnostyczne przebiegu ciśnienia w cylindrze: średnie ciśnienie indykowane, moc indykowana, maksymalne ciśnienie spalania, szybkość wzrostu ciśnienia wewnątrz cylindrowego $dp/d\alpha$ itp., dają ważną informację o ogólnym stanie technicznym elementów zespołu komory spalania. Wyniki badań są wykorzystywane w analizach tendencji do oceny stanu technicznego silników i do opracowania decyzji eksploatacyjnej w aspekcie wytycznych do dalszego ich użytkowania. W przypadku niezdatności zaworu indykatorowego w silnikach okrętowych, parametry przebiegu ciśnienia cylindrowego obarczone są dużym błędem [7].

Obecny stan diagnozowania w eksploatacji okrętowych silników o zapłonie samoczynnym jest niezadowolający i zachodzi konieczność wdrożenia na statkach systemów i urządzeń diagnostycznych, które będą bardziej wiarygodne [1, 6, 10, 14, 16].

Stwierdza się znaczny udział nietrafnych diagnoz na podstawie wykresów indykatorowych [10]. Poszukuje się również innych dziedzin analizy sygnałów przebiegu ciśnienia w cylindrach silnika [10, 11].

3. Program badań

3.1. Obiekty badań

Obiektami badań były silnikami Sulzer i Wätsilä typu 5BAH22, 5ATL25/30, 6AL20/24, 4S20 i 4L20 napędzające prądnice. Badania ciśnienia cylindrowego wykonano dla 30 silników. W tej publikacji zamieszczono wyniki badań silników Sulzer 6A20/24D. Jest to czterosuwowy, średnioobrotowy, nienawrotny, turbodoładowany silnikiem o zapłonie [10].

Badane silniki były zasilane destylacyjnymi lub pozostałościowymi paliwami. Pomiary zostały zrealizowane w naturalnych warunkach podczas postojów statków w portach, stoczniach oraz rejsów, jak również na silnikach w warunkach laboratoryjnych. Zmienne i powtarzalne obciążenie silników realizowano przez załączanie statkowych odbiorników energii elektrycznej lub obciążanie opornikiem wodnym.

3.2. Stanowisko badawcze

Widok przykładowego obiektu badań i przenośnego systemu pomiarowego został pokazany na rysunku 1. Natomiast na rys. 2 przedstawiono schemat układu pomiarowego.



Fig. 1. View of investigated engines and measuring line elements: 1 – test engine, 2 – pressure sensor, 3 – computer

Rys. 1. Widok badanych silników oraz elementów toru pomiarowego: 1 – badany silnik, 2 – czujnik ciśnienia, 3 – komputer

Po wstępnych badaniach zaplanowano weryfikację metody w badaniach zasadniczych w warunkach eksploatacji. W trakcie wstępnych i zasadniczych badań został wykorzystany bierny eksperyment diagnostyczny [16].

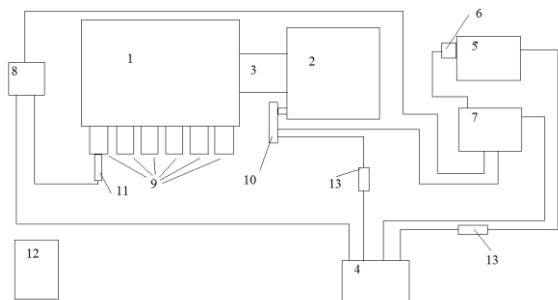


Fig. 2. Test track: 1 – test engine, 2 – generator, 3 – the shaft connecting the engine and generator, 4 – power supply, 5 – laptop, 6 – measuring card, 7 – terminal block, 8 – amplifier, 9 – indicators valves, 10 – crankshaft position sensor, 11 – pressure sensor, 12 – weather monitoring device, 13 – feeder

Rys. 2. Tor pomiarowy: 1 – badany silnik, 2 – prądnica, 3 – wał łączący silnik i generator, 4 – źródło zasilania, 5 – komputer przenośny, 6 – karta pomiarowa, 7 – terminal przyłączeniowy, 8 – wzmacniacz sygnału, 9 – zawory indykatorowe, 10 – czujnik położenia wału korbowego, 11 – czujnik ciśnienia, 12 – urządzenie monitorujące pogodę, 13 – zasilacz

3.2. Metoda badań

Ciśnienia w cylindrach badanych silników były mierzone za pomocą czujnika oporowego. Czujnik ciśnienia został wzorcowany przed pomiarem, za pomocą sprężonego tlenu, dla określenia czułości. Fotooptyczny czujnik został zastosowany do wyznaczania początku akwizycji sygnałów pomiarowych oraz położenia GMP.

W celu analizy sygnałów z wykorzystaniem ciśnienia w cylindrach i parametrów silnika oraz ustalenia diagnozy, konieczne było rejestrowanie danych z odpowiednią częstotliwością próbkowania. Zintegrowany system akwizycji danych został zestawiony i składał się z urządzenia archiwizującego dużą liczbę danych w pamięci operacyjnej, które zostały kontrolowane przez komputer przenośny.

Sygnały ciśnienia w cylindrach były analizowane przy pomocy programu komputerowego DaqView (rys. 3). Oprogramowanie to pozwala na dokonywanie ustawień, obserwowanie wyników pomiarów oraz zapisywanie ich w czasie rzeczywistym. Istnieje również możliwość ustawienia wzmocnienia sygnałów. Program ten pozwala na wykonanie wybranych analiz sygnałów w różnych dziedzinach oraz transformację danych do innych programów. Metoda przeprowadzonych badań polegała na pomiarze ciśnienia w poszczególnych cylindrach i ich analizie dla porównania w dziedzinie czasu rzeczywistego (rys. 4 i 7), amplitudy [10] i częstotliwości (rys. 6 i 9) przy różnych obciążeniach silników o zapłonie samoczynnym.

Wstępne badania polegały na pomiarze przebiegu sygnałów ciśnienia w poszczególnych cylindrach i analizie w różnych dziedzinach oraz

wykazaniu przydatności analizy w wybranej eksperymencie dziedzinie, przy różnych obciążeniach silnika i sprawdzeniu, czy parametry diagnostyczne będą skorelowane z obciążeniem względnym silnika. Wcześniejsze badania autora w innych zastosowaniach wykazały słusność takiego założenia.

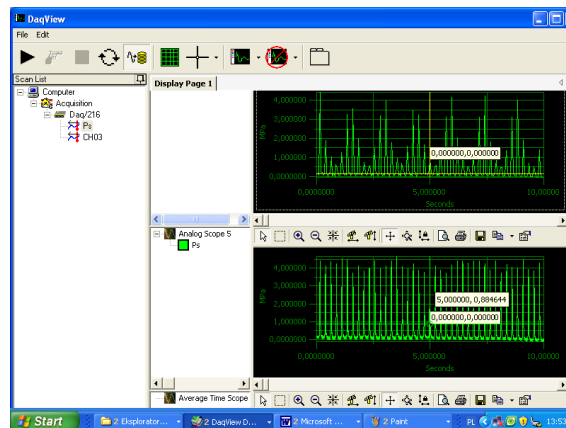


Fig. 3. Sample analysis using DaqView program

Rys. 3. Przykładowe analizy za pomocą programu DaqView

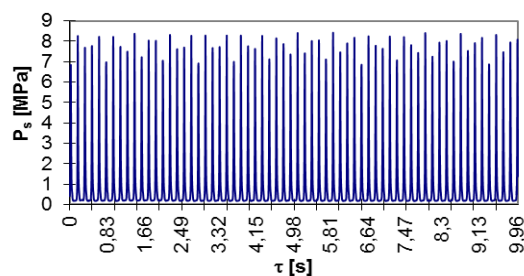


Fig. 4. Time-course of cylinder pressure signals in the frequency band 0÷100 Hz

Rys. 4. Przebieg czasowy sygnału ciśnienia w cylindrze w paśmie częstotliwości 0÷100 Hz

4. Wyniki badań

4.1. Analiza w dziedzinie czasu i częstotliwości

Sygnały były analizowane w różnych pasmach częstotliwości, a szczególnie przydatne okazały się pasma $f = 0-100$ Hz (rys. 4–6) i $f = 0-2,5$ kHz (rys. 7–9). Pasma te okazały się również przydatne do jednoczesnej akwizycji innych sygnałów diagnostycznych. Przy analizie w dziedzinie częstotliwości otrzymano widma poliharmoniczne sygnału okresowego złożonego. Wybrany zakres częstotliwości analizy miał wpływ na wartości amplitud poszczególnych składowych. Ponieważ istotne składowe znajdowały się w początkowym paśmie częstotliwości (rys. 9), to na rys. 10 przedstawiono widmo dla zakresu od 0 do 100 Hz.

Przetwarzanie wieloczęstotliwościowe jest ważnym obszarem cyfrowego przetwarzania

sygnałów dyskretnych, który nie ma odpowiednika w dziedzinie analogowej. Aby mógł on być przetwarzany z możliwie najmniejszą częstotliwością, dopasowanie częstotliwości do standardu, kanału transmisyjnego lub mocy obliczeniowej procesora. Operacja zmniejszania częstotliwości próbkowania sygnału, o czynnik całkowity, nazywana jest *decymacją*. Decymacja jest to przekształcenie sygnału dyskretnego, polegające na zachowaniu, co M -tej próbki, a odrzuceniu pozostałych. Oznaczając sygnał wejściowy, jako S_x , a sygnał wyjściowy, jako S_y , możemy zapisać decymację, jako:

$$S_y(\underline{n}) = S_x(Mn) \quad (1)$$

gdzie M jest współczynnikiem decymacji.

Sygnał po M -krotnej decymacji zawiera M -krotnie mniej próbek od sygnału przed decymacją, co oznacza, że jest próbkowany z M -krotnie mniejszą częstotliwością.

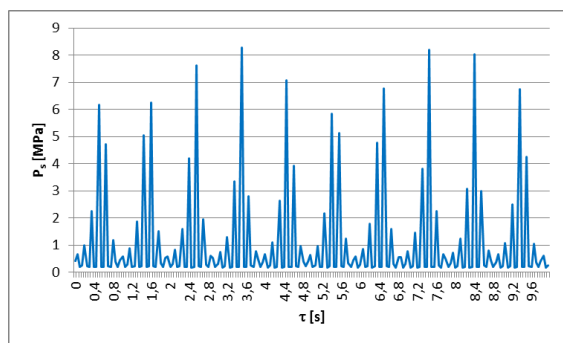


Fig. 5. Decimated time-course of cylinder pressure signal in the frequency band 0÷100 Hz

Rys. 5. Decymacja przebiegu czasowego sygnału ciśnienia w cylindrze silnika w paśmie częstotliwości 0÷100 Hz

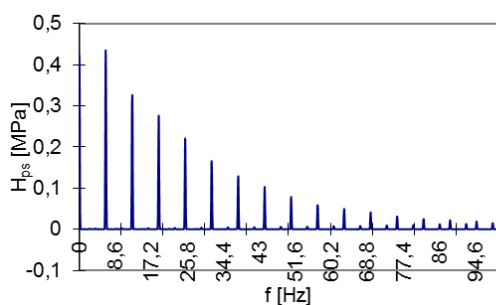


Fig. 6. The spectrum of the in-cylinder pressure of the marine engine in the frequency range 0-100 Hz

Rys. 6. Widmo ciśnienia w cylindrze silnika okrętowego w paśmie częstotliwości 0-100 Hz

Na rysunkach 6 i 10 widać, że uśrednione widmo zawiera wiele charakterystycznych składowych dla różnych wartości częstotliwości. Jest to widmo prążkowe, które przedstawia się graficznie za pomocą "prążków" o długościach proporcjonalnych do wartości amplitud H_1

poszczególnych składowych o częstotliwościach $f_0, 2f_0, 3f_0, \dots, nf_0$ [11]. Gdzie f_0 częstotliwość obrotowa wału rozrządu, co wynika z czterosuwowego obiektu roboczego.

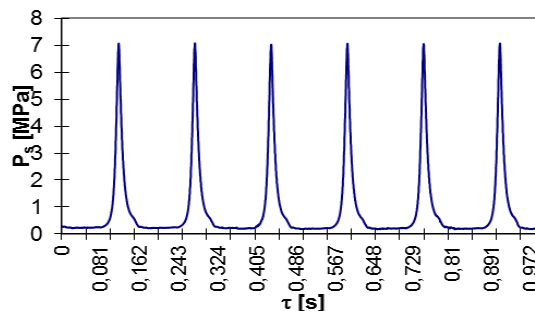


Fig. 7. Time-course of cylinder pressure signals in the frequency band 0÷2500 Hz

Rys. 7. Przebieg czasowy sygnału ciśnienia w cylindrze w paśmie częstotliwości 0÷2500 Hz

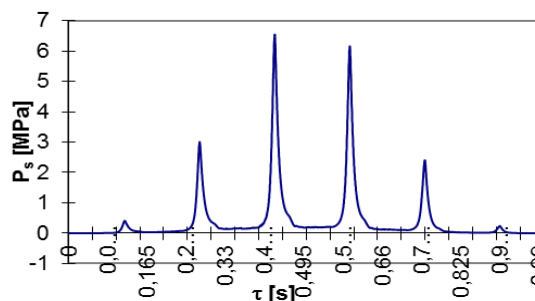


Fig. 8. Decimated time-course of cylinder pressure signal in the frequency band 0÷2500 Hz

Rys. 8. Decymacja przebiegu czasowego sygnału ciśnienia w cylindrze silnika w paśmie częstotliwości 0÷2500 Hz

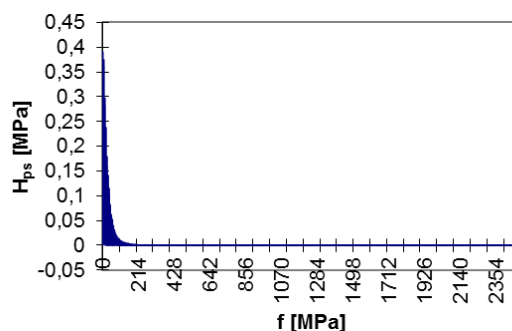


Fig. 9. The spectrum of the pressure in the cylinder marine engine in the frequency range 0-2500 Hz

Rys. 9. Widmo ciśnienia w cylindrze silnika okrętowego w paśmie częstotliwości 0-2500 Hz

W badaniach także zastosowano filtrowanie z wykorzystaniem filtrów częstotliwościowych, modyfikujących widmo częstotliwości przechodzących przez nie sygnałów:

- dolnoprzepustowe (LP – Low Pass),
- górnoprzepustowe (HP – High Pass),
- pasmowo przepustowe (BP – Band Pass),
- pasmowo zaporowe (BS – Band Stop).

Wpływ obciążeń względnych silnika (OW) w zakresie 0–100%, zgodnie z programem prób odbiorczych silników, na widma amplitudowe zestawiono na rys. 11. Widać, że wraz z obciążeniem silnika wartości amplitud w widmach rosą.

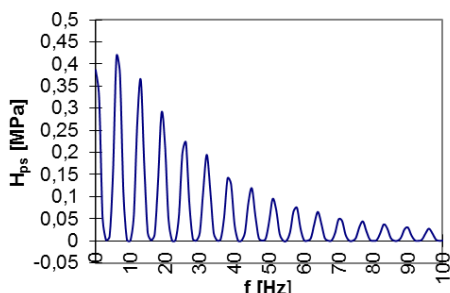


Fig. 10. The visible part of the spectrum of fig. 9 in the frequency range of 0–100 Hz

Rys. 10. Widoczny fragment widma z rys. 9 w paśmie częstotliwości w zakresie 0–100 Hz

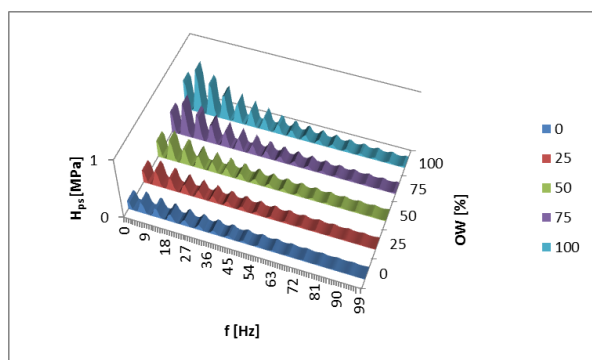


Fig. 11. The lamellar graph of influence of the marine engine load OW on the spectrum of the in-cylinder pressure in the frequency range 0–100 Hz

Rys. 11. Wykres warstwowy wpływu obciążenia silnika okrętowego OW na widmo ciśnienia w cylindrze w paśmie częstotliwości 0–100 Hz

4.2. Analiza falkowa

Transformacie Fouriera brakuje własności lokalizacji sygnału, ponieważ rozkłada ona sygnał na fale płaskie opisywane za pomocą funkcji trygonometrycznych. Transformata falkowa wykorzystuje prawie dowolnie wybraną lokalizację funkcji ψ , którą dla analizy sygnału poddaje się transformacjom i skalowaniu.

Dla danej falki $\psi(\tau)$ można skonstruować rodzinę falek indeksowaną parametrem a:

$$\psi_a(\tau) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{\tau}{a}\right) \quad a \neq 0 \quad (2)$$

gdzie $1/\sqrt{|a|}$ jest czynnikiem skali.

Za pomocą parametru b funkcję $\psi_a(\tau)$ poddaje się translacji otrzymując dwuparametrową rodzinę:

$$\psi_{a,b}(\tau) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{\tau-b}{a}\right) \quad \text{przy } a, b \text{ rzeczywistych}$$

i $a \neq 0$ (3)

Metody zastosowania teorii falek oparte są na szybkich algorytmach FWT (Fast Wavelet Transformation) do wyznaczania wielkości fizycznych na podstawie wyników pomiarów, rozpoznawania obrazów, itd. Daną transformację falkową definiuje jedna macierzysta funkcja falkowa, a pod wpływem zmiany parametru skali a i parametru przesunięcia b otrzymuje się rodzinę falek, która jest wykorzystywana do dekompozycji analizowanego sygnału s(t) na składowe o różnym poziomie detali.

Zastosowanie dyskretnej transformacji falkowej prowadzi do zmniejszenia liczby współczynników o połowę, wraz ze wzrostem poziomu dekompozycji sygnału (rys. 12):

$$S = a_1 + d_1 = a_2 + d_2 = d_1 + a_3 + d_3 + \dots + d_2 + d_1 \quad (4)$$

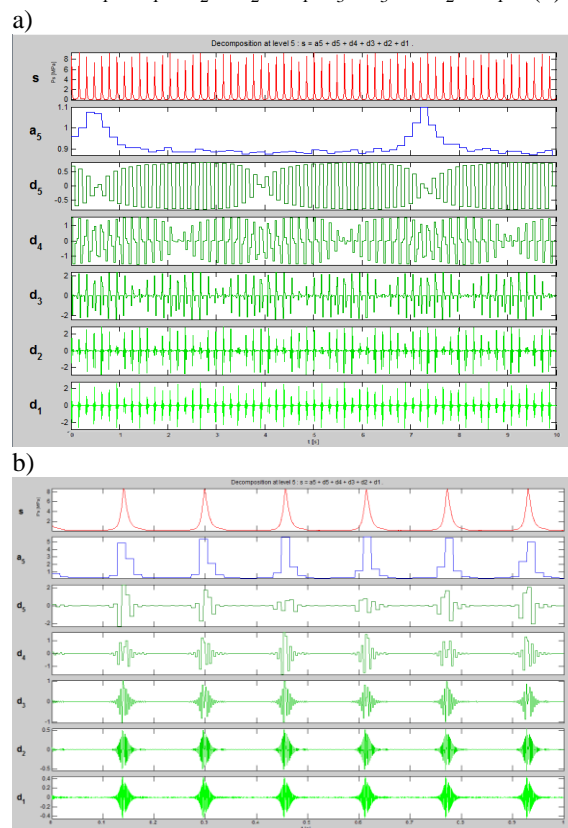


Fig. 12. Wavelet decomposition of the in-cylinder pressure signal on the db10 level in the frequency band: a) 0 – 100 Hz, b) 0 – 2500 Hz

Rys. 12. Dekompozycja falka sygnału przebiegu ciśnienia w cylindrze na poziomie db10 w paśmie częstotliwości: a) 0–100 Hz, b) 0–2500 Hz

W trakcie dekompozycji sygnału jest on rozkładany na element dolnoprzepustowy (a) i górnoprzepustowy (d). Dalsza dekompozycja dokonywana jest częścią dolnoprzepustową wykonaną w poprzednim etapie. Proces syntezy

sygnału realizowany jest według tego samego algorytmu w odwrotnym kierunku. Podstawowy sygnał ma przedstawić zgodnie z formułą (4). Zapis ten przedstawia idee przeprowadzania dekompozycji i syntezy oryginalnego sygnału. Znak plus traktowany jest syntetycznie, a nie matematycznie.

5. Analiza wyników badań

Wartości pierwszych sześciu składowych amplitud dla różnych obciążeń względnych silnika (OW) zestawiono na rys. 13. Widać, że punkty pomiarowe tworzą zależność liniową. Na rys. 14 przedstawiono wartości pierwszych sześciu składowych widm przebiegu ciśnienia w cylindrach silnika dla różnych cylindrów przy tym samym obciążeniu.

Dla zweryfikowania metody na rys. 15 przedstawiono wartości amplitud pierwszej składowej dla stałego obciążenia silnika w poszczególnych cylindrach. Dla cylindrów nr 3 i 4 stwierdzono małe wartości pierwszej składowej. Po zdemontowaniu wtryskiwaczy stwierdzono ich niezdatność – brak rozpylania paliwa.

W pracy [16 cz. 2. rozdz. 1] wskazano, że w niskich pasmach częstotliwości, w pierwszych fazach rozwoju uszkodzeń występują zmiany kurtozy. Zastosowano ją również do oceny widm przebiegu ciśnienia w komorach spalania według wzoru:

$$K = \frac{m_4}{\sigma^4} \quad (5)$$

Kurtoza z próby wyraża się wzorem:

$$K = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{sr})^4}{\sigma^4} - 3 \quad (6)$$

gdzie y_i to i -ta wartość parametru, y_{sr} to wartość oczekiwana w populacji, σ to odchylenie standardowe w populacji, zaś n to liczebność próby. Jest ona jedną z miar spłaszczenia rozkładu wartości cechy. Jest miarą skupienia poszczególnych obserwacji wokół średniej. Im większa wartość współczynnika tym bardziej wysmukła krzywa liczebności, większa koncentracja wartości cech wokół średniej.

Jeżeli przyjęto, że zbiorowość ma rozkład normalny, to $K = 3$, jest bardziej spłaszczony rozkład od normalnego, gdy $K < 3$, a bardziej wysmukły, gdy $K > 3$. Rys. 15 pokazuje, że dla cylindrów nr 3 i 4, gdzie były wtryskiwacze uszkodzone, wartości kurtozy są duże.

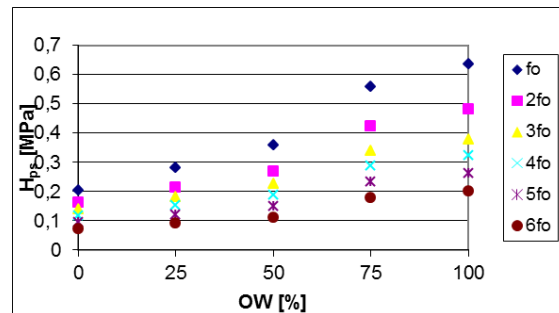


Fig. 13. Effect of relative engine load OW to the amplitudes of the first six components in-cylinder pressure course

Rys. 13. Wpływ obciążenia względnego silnika OW na wartości amplitud pierwszych sześciu składowych przebiegu ciśnienia w cylindrze silnika

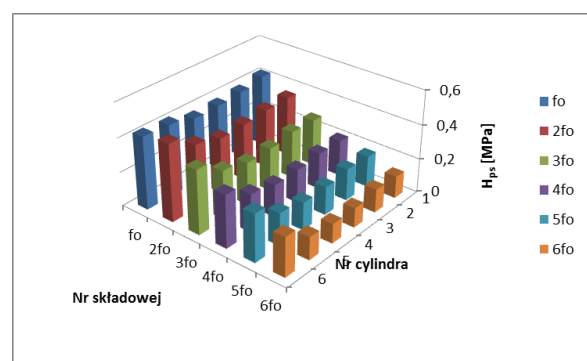


Fig. 14. The values of the amplitudes of the first component spectra of pressure in the cylinders 6AL20/24D engine at 50% load

Rys. 14. Wartości amplitud pierwszych składowych widm ciśnienia w cylindrach silnika 6AL20/24 D przy obciążeniu 50%

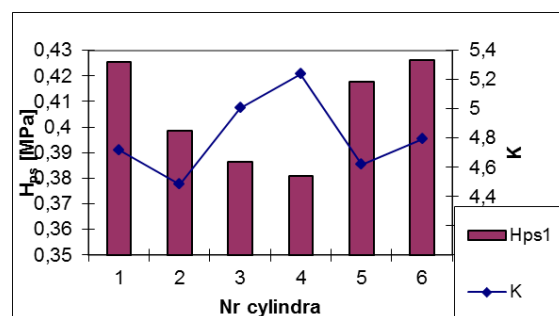


Fig. 15. The values of the amplitudes of the first component and kurtosis for each cylinder with for 55% engine load

Rys. 15. Wartości amplitud pierwszej składowej oraz kurtozy dla poszczególnych cylindrów przy obciążeniu 55%

Za pomocą współczynnika korelacji i wrażliwości [16] starano się również ocenić, które diagnostyczne są najbardziej przydatne (tabela 1). W analizach w różnych dziedzinach wyznaczono współczynnik korelacji zależności:

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (7)$$

gdzie: $\text{cov}(x, x)$ - kowariancja zmiennych x i y ,
 σ_x, σ_y - odchylenia standardowe zmiennych x i y .

Otrzymano związki bardzo ściśle z wartościami współczynników korelacji (tabela 1), powyżej 0,95, co wskazuje na dużą przydatność większości symptomów. Największe wartości współczynnika korelacji dla przedstawionych danych uzyskano w kolejności dla: składowych widma nr 4 i 5 oraz maksymalnego ciśnienia spalania.

Table 1 Values of correlation and sensitivity coefficient of the diagnostic parameters for exemplary in the preliminary investigations

Tabela 1. Wartości współczynnika korelacji i wrażliwości dla przykładowych parametrów diagnostycznych w badaniach wstępnych

L. p.	Wielkość	r	w_w
1	H_{p1}	0,9974	1,544
2	H_{p2}	0,9929	1,939
3	H_{p3}	0,9974	2,251
4	H_{p4}	0,9975	2,528
5	H_{p5}	0,9986	2,889
6	H_{p6}	0,9523	3,339
7	p_i	0,9947	0,6637
8	p_{smax}	0,9995	0,5128
9	p_{rms}	0,9980	0,6087
10	p_{aver}	0,9962	0,6536
11	K	0,9995	-0,2556
12	Miara falkowa	0,9977	0,6198

Z przedstawionej tabeli wynika, że wszystkie przykładowe parametry diagnostyczne są dobrze skorelowane z wielkościami wejściowymi,

osiągając związki bardzo ściśle. Dla tych danych największa wartość współczynnika korelacji uzyskano dla maksymalnego ciśnienia spalania (P_{smax}) oraz Kurtozy (K), lecz najbardziej wrażliwością na zmiany wielkości wejściowej są amplitudy składowych widm.

5. Wnioski

Przeprowadzone badania upoważniają do sformułowania następujących wniosków:

- możliwy jest wybór takich symptomów diagnostycznych przebiegu ciśnienia czynnika w komorze spalania, które będą skorelowane z względnym obciążeniem oraz ze stanem technicznego silnika okrętowego;
- miary widmowe, amplitudowe i falkowe przebiegu ciśnienie w komorze spalania są dobrymi symptomami diagnostycznymi;
- są to miary znacznie łatwiejsze do wyznaczenia i wdrożenia niż średnie ciśnienie indykowane;
- dalsza selekcja przeprowadzona będzie na podstawie badań dla większej liczby różnego typu silników;
- diagnozowanie tłokowego silnika okrętowego powinno się odbywać w stanach ustalonych przy stałym obciążeniu;
- stan techniczny aparatury wtryskowej miał wpływ na wartości harmonicznym amplitud widma przebiegu ciśnienia w komorze spalania;
- wymienioną metodę można zastosować w większości silników okrętowych bez adaptacji, jeżeli są wyposażone w zawory indykatorowe;
- metoda ta nie wymaga zastosowania znacznika wału korbowego, co może być problemem, gdy nie można zatrzymać silnika, aby zamocować czujnik.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

f	Vibration frequency/częstotliwość drgań
GMP	Top dead centre/górne martwe położenie
K	Kurtosis/kurtoza
H_{ps}	The amplitude harmonic of the spectrum in-cylinder pressure/amplituda składowej widma ciśnienia w cylindrze silnika
p_{aver}	Mean value of in-cylinder pressure course/wartość średnia przebiegu ciśnienia w cylindrze
p_i	Mean indicator pressure/średnie ciśnienie indykowane

p_{rms}	Root-mean-square value of in-cylinder pressure course/wartość skuteczna przebiegu ciśnienia w cylindrze
P_s	In-cylinder pressure of engine/ciśnienie w cylindrze silnika
P_{smax}	Maximum combustion spalania/ maksymalne ciśnienie spalania
OW	Relative load/obciążenie względne
σ	Standard deviation of the variable/odchylenie standardowe zmiennej
τ	Time/czas

Bibliography/Literatura

- [1] Aghdam A. E., Kabir M. M.: Validation of a blow by model using experimental results in monitoring condition with the change of

compression ratio and engine speed. Experimental Thermal and Fluid Science 2010, № 2, s. 197–209.

- [2] Ambrozik A.: Analiza cyklu pracy czterosurowych silników spalinowych. Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2010 r.
- [3] Bareli L., Bidini G., Buratti C., Mariani R., Diagnosis of internal combustion engine through vibration and acoustic pressure non-intrusive measurements. Applied Thermal Engineering 2009 № 8–9, s. 1707–1713, Rensselaer 2009.
- [4] Chłopek Z., Piaseczny L.: Statistical investigations of fast changeable processes occurring in ship piston combustion engine, Polish Maritime Research 2005, No 2, pp. 10–16, Gdańsk 2005.
- [5] Citron S.J., O'Higgins S.J., Chen L.Y.: In-cylinder pressure reconstruction for multi-cylinder si-engine by combined processing of engine speed and one cylinder pressure. SAE Technical Paper 890486, 1989.
- [6] Lus T.: Contemporary diagnostic and tuning methods for marine diesel engines. Journal of KONES Powertrain and Transport, 2007 vol. 14, No. 4, Pp. 239 – 246, Warsaw 2007.
- [7] Łutowicz M.: Przesunięcie obrazu GMP na wykresie indykatorowym, jako symptom utraty drożności kanału indykatorowego. XXXII Sympozjum Siłowni Okrętowych SymSO 2011, Szczecin 2011, s. 37–38, cd. s. 1–8.
- [8] Mendera K. Z., Gruca, M.: Wyznaczenie GMP tłoka. Journal of KONES 2005, vol. 12, 1–2, s. 225–232, Warsaw 2005.
- [9] Minghua D.: Prediction of engine working condition based on the vibrational signal of engine cylinder cover. Journal of Shanghai Maritime University, Vol.7, no 2, 2001.
- [10] Monieta J.: Zastosowanie analizy widmowej sygnału przebiegu ciśnienia w cylindrach okrętowych silników spalinowych do diagnozowania w warunkach eksploatacji. XXXII Sympozjum Siłowni Okrętowych SymSO 2011, Szczecin 2011, s. 40–41, cd. s. 1–8.
- [11] Monieta, J., Rutkowski, J.: The application of spectrum analysis of course of pressure in combustion chamber for diagnosis of medium speed marine diesel engines. Journal of KONES Powertrain and Transport 2008 vol. 15, No. 3, s. 367–374, Warsaw 2008.
- [12] Polanowski S.: Studium metod analizy wykresów indykatorowych w aspekcie diagnostyki silników okrętowych. Zeszyty Naukowe Marynarki Wojennej 2007 nr 169 A, Gdynia 2007.
- [13] Takai, M., Tsukahara, S.: Performance and combustion analysis of high-speed Diesel engine in fast ferry under normal service condition. 24 CIMAC World Congress on Combustion and Rail Traction, pp. 1–8, Kyoto 2004.
- [14] Witkowski, K.: Stan diagnostyki technicznej okrętowych silników tłokowych. Diagnostyka Vol. 24 2005, s. 85–92, Olsztyn 2005.
- [15] Żółtowski B.: Badanie struktury sygnału wibroakustycznego procesu spalania w silnikach tłokowych. Silniki Spalinowe 1980 nr 2, s. 17–19.
- [16] Żółtowski B., Cempel C.: Inżynieria diagnostyki maszyn, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej. Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004.

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.

