

The conception of diagnosing the technical condition of marine diesel engine driving a synchronous generator

Abstract: In the paper the conception and preliminary assumptions of the developed method of diagnosing some selected structural elements of an undercharged auxiliary marine diesel engine not equipped by the manufacturer with indicator valves, and cooperating with the synchronous generator are presented. The proposed method is based on assumption that there is a correlation between the technical condition of the engine and generator, the pressure waveforms in the exhaust manifold as a function of time or angular position of the engine crankshaft, and the frequencies and amplitudes of vibration accelerations of selected parts of the set ZE400/52 type. Test program and some results of vibrations measurements are presented. It allowed for the initial selection of structural elements of the generator set in which measurements will be made during further research.

Key words: generating set, marine auxiliary diesel engine, synchronous generator, diagnostics

Koncepcja diagnozowania stanu technicznego okrętowego silnika spalinowego napędzającego prądnicę synchroniczną

Streszczenie: W referacie przedstawiono koncepcję oraz podstawowe założenia opracowywanej metody diagnozowania wybranych elementów struktury niedoładowanego pomocniczego okrętowego silnika spalinowego, nie wyposażonego przez producenta w zawory indykatorowe oraz współpracującej z nim prądnicy synchronicznej. Proponowana metoda bazuje na założeniu, że istnieje zależność pomiędzy stanem technicznym silnika i prądnicy, parametrami procesów gazodynamicznych spalin w kanałach wylotowych, napięciami międzyfazowymi prądnicy oraz przyspieszeniami drgań wybranych elementów funkcjonalnych zespołu prądotwórczego typu ZE400/52. Przedstawiono program badań oraz wyniki pomiarów przyspieszeń drgań wybranych elementów zespołu prądotwórczego elektrowni okrętowej. Wstępnie wytypowano elementy struktury konstrukcyjnej zespołu, w których będą dokonywane pomiary w czasie dalszych badań.

Słowa kluczowe: zespół prądotwórczy, okrętowy tłokowy silnik spalinowy, silnik pomocniczy, prądnica synchroniczna, diagnostyka

1. Wstęp

Na okrętach Marynarki Wojennej RP powszechnie stosowane są pomocnicze tłokowe silniki spalinowe, które nie są wyposażone w zawory indykatorowe. Powoduje to określone problemy eksploatacyjne bieżące i długofalowe. Z tego względu silniki takie, o ograniczonej podatności kontrolnej, podlegają strategii eksploatacji wg tzw. rezerwu godzinowego: przeglądy techniczne i remonty przeprowadzane są po ściśle określonym czasie pracy. Opracowanie metody parametrycznej oceny stanu technicznego silników napędzających prądnice synchroniczne pozwoli na zastosowanie wobec nich korzystniejszej ekonomicznie strategii eksploatacji wg ich stanu technicznego [1].

Bezinwazyjną metodę diagnozowania przestrzeni roboczych okrętowych doładowanych silników spalinowych o ograniczonej podatności diagnostycznej opracowano w Akademii Marynarki Wojennej [2, 3, 9]. Bazuje ona na pomiarach ciśnienia spalin w przekrojach kontrolnych kanału łączącego cylindry silnika z turbiną turbosprężarki.

Pozwala na wczesną identyfikację i lokalizację szeregu stanów niezdatności technicznej silnika.

Do tej pory nie ma natomiast skutecznej metody parametrycznej oceny stanu technicznego niedoładowanych okrętowych silników pomocniczych napędzających prądnice synchroniczne, nie wyposażonych w zawory indykatorowe. Uniemożliwia to zastosowanie wobec nich strategii eksploatacji według stanu technicznego, stosowana jest jedynie strategia eksploatacji według rezerwu godzinowego [1]. Pojawia się też inny problem badawczy: czy jest możliwa ocena stanu technicznego silnika za pomocą prostych pomiarów parametrów prądnicy?

2. Opis stanowiska badawczego

Obiektem badań jest zespół prądotwórczy ZE400/52, wyposażony w silnik LEYLAND typu SW400 oraz prądnicę synchroniczną typu GCPf-94c/1, zainstalowany na stanowisku laboratoryjnym na Wydziale Mechaniczno-Elektrycznym Akademii Marynarki Wojennej. Takie zespoły prądotwórcze instalowane są również na małych okrętach mary-

narki wojennej. Badany silnik jest czterosurowym, sześciocylindrowym, rzędownym niedoładowanym silnikiem pomocniczym.

Dane techniczne silnika zespołu prądowórczego zgrupowano w tabeli 1 [10].

Tabela 1. Charakterystyka techniczna silnika typu SW400 [10]

Moc znamionowa	54,06 kW	Rodzaj wtrysku	Bezpośredni
Znamionowa prędkość obrotowa	1500 min ⁻¹	Kolejność wtrysku	1-5-3-6-2-4
Liczba cylindrów	6	Ciśnienie wtrysku	16,18 – 16,67 MPa
Skok tłoka	120,65 mm	Jednostkowe zużycie paliwa	190 g/kWh
Średnica cylindra	107,19 mm	Początek otwarcia zaworu dolotowego	100 przed GMP
Objętość skokowa	6540 cm ³	Zamknięcie zaworu dolotowego	500 po DMP
Stopień sprężania	16	Początek otwarcia zaworu wylotowego	460 przed DMP
Ciśnienie sprężania	1,96 MPa	Zamknięcie zaworu wylotowego	140 po GMP

W skład stanowiska laboratoryjnego wchodzi trzy zespoły prądowórcze typu ZE400/52. Mogą one pracować niezależnie bądź synchronicznie na wspólną sieć energetyczną.

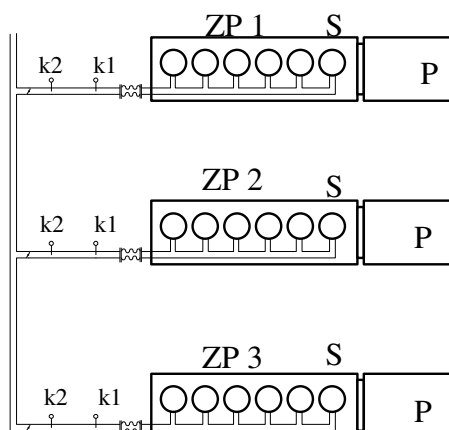
Silnik napędzający prądnicę trójfazową synchroniczną typu GCPF-94c/1 pracuje z prędkością obrotową wału korbowego wynoszącą 1500 min⁻¹. Odpowiada to częstotliwości napięcia generowanego przez prądnicę wynoszącej 50 Hz. Obciążenie silnika momentem obrotowym można zadawać poprzez załączanie odbiorów energii elektrycznej (rezystorów powietrznych). Za pomocą rezystorów można odebrać od prądnicy moc w zakresie 0 ÷ 25 kW.

Schemat stanowiska laboratoryjnego pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Widok ogólny elektrowni okrętowej na stanowisku laboratoryjnym

Schemat układu spalin wylotowych zespołów prądowórczych zainstalowanych w laboratorium pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat układu spalin wylotowych zespołów prądowórczych zainstalowanych w laboratorium: S – silnik, P – prądnica, ZP – zespół prądowórczy, k₁ i k₂ – przekroje kontrolne.

3. Opis aparatury badawczej

Do pomiarów wykorzystano uniwersalny moduł kontrolno-pomiarowy Advantech typu USB-4711A (rys. 3), pozwalający na jednoczesny pomiar i rejestrację danych z 16 kanałów analogowych w zakresach pomiarowych wejściowych ±10V, ±5V, ±2.5V, ±1.25V, ±0.625V; zakresy wyjściowe ±10V, ±5V, 0÷10V, 0÷5V; z rozdzielczością 12 bitów oraz z częstotliwością próbkowania do 150 kS/s, posiadający interfejs USB 2.0. Z modułem współpracuje zaprojektowany i wykonany przez autorów na potrzeby prowadzonych badań, przetwornik wielkości mierzonych typu PWM-2010 (rys. 3). Dostosowuje on parametry sygnałów z czujników do możliwości modułu kontrolno-pomiarowego. Pozwala też na bezpieczne pomiary napięć międzyfazowych prądnicy - 400 V - poprzez odizolowanie galwaniczne od przyrządu pomiarowego. Urządzenie może współpracować z przetwornikami ciśnienia OPTRAND typu C11294-Q oraz akcelerometrami typu KD35 lub Brüel & Kjaer typu 4384.



Rys. 3. Aparatura pomiarowa stosowana w badaniach: 1 – komputer, 2 – uniwersalny moduł

pomiarowy Advantech USB-4711A, 3 – przetwor-
nik wielkości mierzonych PWM-2010.

4. Plan realizacji badań

Opracowując plan realizacji badań założono, że badania prowadzone będą dla stanów pracy ustalonej, w związku z czym przyjęto plan statyczny. Na wstępie opracowywania planu realizacji badań przyjęto wszystkie wartości parametrów wejściowych. Parametry te dobrano na podstawie analizy logicznej struktury konstrukcyjnej oraz warunków pracy zespołu prądotwórczego. W prowadzonych badaniach zastosowano plan zdeterminowany, gdzie parametrami wejściowymi są: obciążenie silnika momentem obrotowym M (proporcjonalnym do mocy odbieranej od prądnicy) oraz wprowadzony do układu stan niezdatności eksploatacyjnej silnika. Ze względów praktycznych przyjęto plan selekcyjny, pozwalający ograniczyć liczbę wartości parametrów wejściowych [7]. Plan kompletny byłby niezwykle skomplikowany w realizacji, ponieważ wartości obciążenia silnika momentem obrotowym mogą ulegać zmianie w sposób ciągły w pełnym dopuszczalnym zakresie ich zmian. W związku z tym zdecydowano się na przyjęcie planu poliselekcyjnego drugiego stopnia [7]. Ustalono wartości obciążenia silnika momentem obrotowym odpowiadające pracy silnika na biegu luzem oraz obciążeniu odpowiadającemu mocy pobieranej przez odbiory wynoszącej 20 kW. Dodatkowo w celu poznania charakteru zmian mierzonych parametrów jako funkcji momentu obrotowego zdecydowano się na realizację pomiarów przy obciążeniu odpowiadającemu mocy 12 kW. Drugim parametrem wejściowym przyjętym w planie badania był stan techniczny zespołu prądotwórczego. Założono dwa odmienne stany: stan pełnej zdatności technicznej zespołu oraz stan częściowej zdatności technicznej [1], polegający na wyłączeniu z pracy jednego z cylindrów silnika przez odcięcie paliwa za pomocą zaworu trójdrożnego (rys. 4). Plan realizacji badań eksperymentalnych przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Plan realizacji badań eksperymentalnych

Nr układu wartości parametrów wejściowych	Moc pobierana z prądnicy	Stan techniczny silnika
	[kW]	[-]
1	0	Zdatny
2	20	Zdatny
3	0	Cz. Zdatny
4	20	Cz. Zdatny

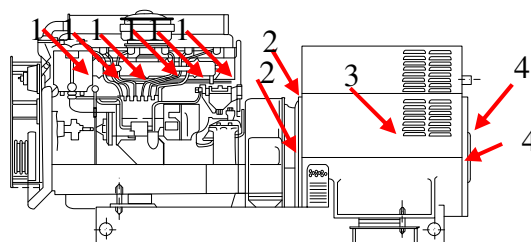


Rys. 4. Widok instalacji paliwowej silnika typu SW400 umożliwiającej odcięcie dopływu paliwa do wybranego wtryskiwacza

Analiza struktury konstrukcyjnej zespołu pozwoliła na wytypowanie do pomiaru następujących parametrów energetycznych zespołu prądotwórczego:

- przyspieszenia drgań wtryskiwaczy poszczególnych cylindrów silnika,
- przyspieszenia drgań wybranych elementów prądnicy współpracującej z silnikiem,
- pulsacje ciśnienia spalin w przekrojach k_1 i k_2 kanału wylotowego (rys. 1),
- wartości napięć międzyfazowych prądnicy (za regulatorem napięcia) [5].

Miejsca pomiaru poszczególnych parametrów energetycznych zostały przedstawione na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat zespołu prądotwórczego z zaznaczonymi miejscami pomiaru przyspieszeń drgań: 1 – drgania wtryskiwaczy poszczególnych cylindrów, 2 – drgania łożyska baryłkowego prądnicy, 3 – drgania statora prądnicy, 4 – drgania łożyska kulkowego prądnicy

Pomiary przyspieszeń drgań wytypowanych elementów struktury konstrukcyjnej zespołu prądotwórczego zrealizowano w następujących miejscach:

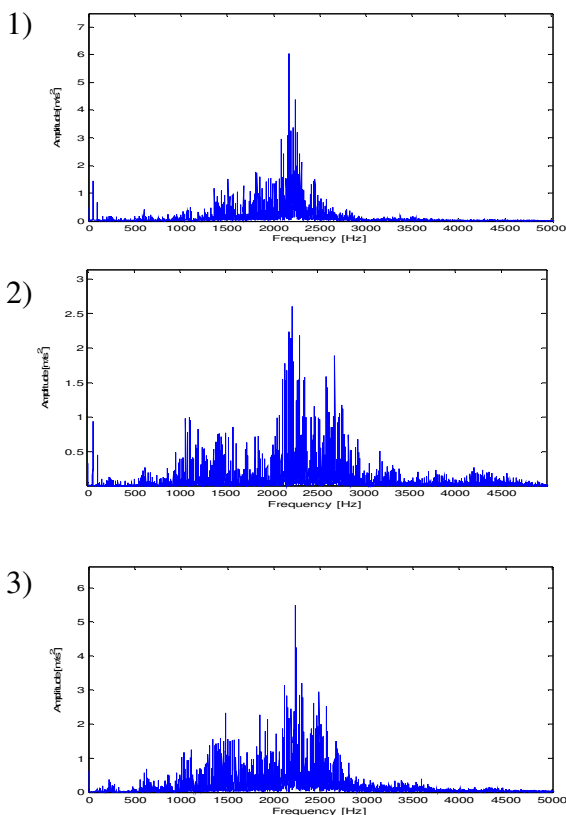
- na wtryskiwaczach poszczególnych cylindrów silnika (1),
- na łożysku baryłkowym prądnicy, w dwóch płaszczyznach wzajemnie prostopadłych (2),
- na stojanie prądnicy (3),
- na łożysku kulkowym prądnicy w dwóch płaszczyznach wzajemnie prostopadłych (4).

Drgania wtryskiwaczy pozwalają na synchronizację wszystkich wykonywanych pomiarów parametrów energetycznych zespołu prądotwórczego z cyklem roboczym silnika. Pomiar drgań wszyst-

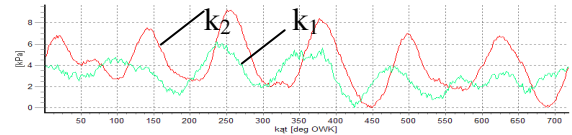
kich wtryskiwaczy podyktowany został faktem, że w przypadku, gdy nieznan jest stan techniczny silnika oraz jego wtryskiwaczy, uzyskany sygnał drganiowy z pojedynczego wtryskiwacza może mieć zbyt niską jakość do przeprowadzenia synchronizacji. Pozostałe pomiary przyspieszeń drgań poddano analizie za pomocą dyskretnej transformaty Fouriera [4,5,8].

5. Wyniki prowadzonych badań

Zgodnie z opracowanym planem realizacji badań pomiary wykonano dla ustalonej prędkości obrotowej wału korbowego silnika wynoszącej 1500 min^{-1} dla następujących obciążeń silnika momentem obrotowym: biegu luzem, gdy silnik pracuje na pokonanie oporów własnych oraz oporów prądnicy, obciążenia odpowiadającemu odbiorowi mocy z prądnicy wynoszącego 20 kW. Dodatkowo w celu poznania charakteru przebiegu parametrów wykonano pomiary dla obciążenia pośredniego wynoszącego 12 kW. Badania prowadzono dla dwóch odmiennych stanów zdatności technicznej silnika tzn. dla stanu całkowitej zdatności oraz stanu częściowej zdatności technicznej silnika polegającej na wyłączeniu z pracy jednego z cylindrów. Reprezentatywne wyniki prowadzonych badań dla stanu pełnej zdatności technicznej silnika przedstawiono na rysunkach 6, 7.

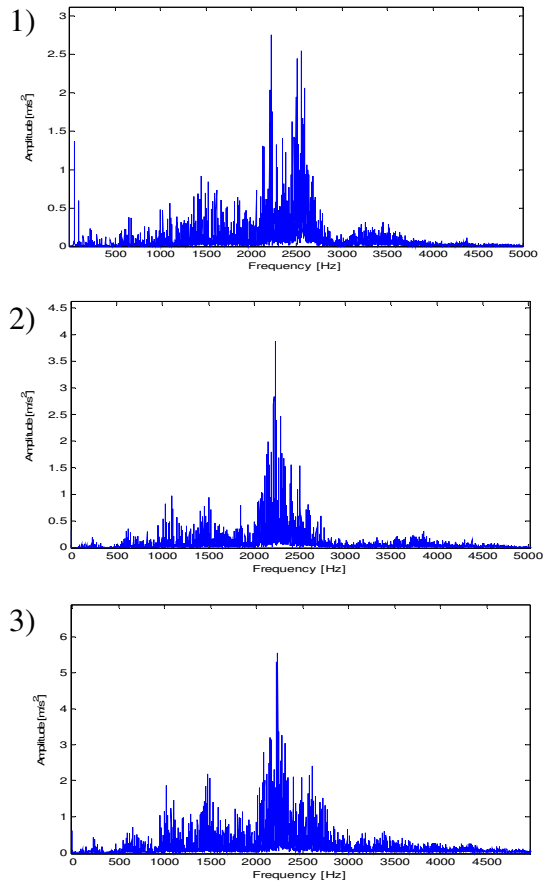


Rys. 6. Widmo amplitudowe przyspieszeń drgań mierzonych na łożysku baryłkowym prądnicy (stan pełnej zdatności technicznej): 1 – bieg luzem, 2 – obciążenie 12 kW, 3 – obciążenie 20 kW



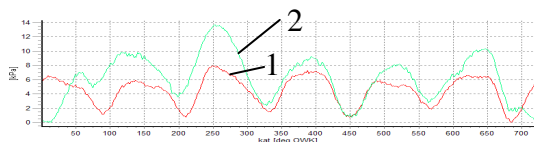
Rys. 7. Przebieg ciśnienia spalin w przekrojach kontrolnych k_1 i k_2 jako funkcji kąta obrotu wału korbowego (stan pełnej zdatności technicznej)

Wyniki prowadzonych badań dla stanu częściowej zdatności technicznej silnika przedstawiono na rysunkach 8, 9.



Rys. 8. Widmo amplitudowe przyspieszeń drgań mierzonych na łożysku baryłkowym prądnicy (odcięte paliwo do jednego z cylindrów silnika), 1 – bieg luzem, 2 – obciążenie 12 kW, 3 – obciążenie 20 kW

Na rysunku 9 przedstawiono porównanie przebiegów ciśnienia w przekroju kontrolnym k_2 jako funkcji kąta obrotu wału korbowego dla silnika zdatnego oraz po odcięciu paliwa do jednego z cylindrów.



Rys. 9. Przebieg ciśnienia spalin w przekroju k_2 jako funkcji kąta obrotu wału korbowego (obciążenie 12 kW) silnika w stanie pełnej zdatności technicznej (1) i w stanie częściowej zdatności technicznej (2)

6. Podsumowanie

W referacie poruszono problem diagnozowania pomocniczego okrętowego silnika nie wyposażonego w zawory indykatorowe, napędzającego prądnicę synchroniczną. Podjęto próbę określenia

zależności stanu technicznego silnika od zmian ciśnienia spalin w wybranych przekrojach kanału wylotowego oraz drgań elementów napędzanej prądnicy. Otwartym pozostaje problem: czy jest możliwa ocena stanu technicznego silnika spalinowego za pomocą nieskomplikowanych pomiarów wykonanych na prądnicy. Na podstawie wykonanych pomiarów i ich analizy jakościowej można sądzić, że mierzone parametry energetyczne zmieniają się wraz z obciążeniem silnika i symulowaną niesprawnością silnika. Ze względów praktycznych potrzeba więcej obserwacji, również podczas pracy równoległej zespołów oraz, być może, bardziej dokładnej aparatury pomiarowej. Wykonane badania pokazują, że możliwe jest określenie parametrów diagnostycznych oraz krytycznych miejsc prądnicy, aby określić stan techniczny łokowego silnika spalinowego napędzającego tę prądnicę.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

P Generator/prądnica

ZSE Power station/zespół prądowórczy

S Diesel engine/silnik spalinowy

Bibliography/Literatura

- [1] Kluj S.: Diagnostyka urządzeń okrętowych, WSM, Gdynia 2000.
- [2] Korczewski Z, Zacharewicz M.: Metoda diagnozowania silników okrętów wojennych o ograniczonej możliwości pomiaru ciśnień wewnątrzcyldrowych na podstawie wyników badania procesów gazodynamicznych w układzie turbodoładowania, opracowanie w ramach projektu badawczego MNiSW nr: OT00B02129, Gdynia 2008.
- [3] Korczewski Z., Zacharewicz M.: Evaluation of working spaces' technical condition of marine diesel engine on the basis of operation research, Journal of Polish CIMAC 2010 vol. 4 No. 1 str. 85-94.
- [4] Kurowski W.: Podstawy diagnostyki systemów technicznych. Metodologia i metodyka, Warszawa-Płock 2008
- [5] Mindykowski J, Tarasiuk T, Szweda M., Evans I.C.: Electric power quality measurements on All-electric ship with AC active front end propulsion drives, Technical report No.68 Polskiego Rejestru Statków, Gdańsk 2007.
- [6] Moczulski W.A., Diagnostyka techniczna. Metody pozyskiwania wiedzy, Gliwice 2002
- [7] Polański, Z.: Planowanie doświadczeń w technice, PWN, Warszawa 1984.
- [8] Randall R.B., Frequency Analysis. Application of B&K Equipment, 1977
- [9] Zacharewicz M.: Metoda diagnozowania przestrzeni roboczych silnika okrętowego na podstawie parametrów procesów gazodynamicznych w kanale zasilającym turbosprężarkę, rozprawa doktorska, Gdynia 2009.
- [10] Dokumentacja Techniczna Zespołu Prądowórczego typu ZE400/52.

Mr Marcin Zacharewicz, DEng. – Doctor in the Faculty of Mechanical and Electrical Engineering at the Polish Naval Academy.

Dr inż. Marcin Zacharewicz – wykładowca na Wydziale Mechaniczno-Elektrycznym Akademii Marynarki Wojennej.

e-mail: M.Zacharewicz@amw.gdynia.pl



Mr Aleksy Cwalina, DEng. – Doctor in the Faculty of Mechanical and Electrical Engineering at the Polish Naval Academy.

Dr inż. Aleksy Cwalina – adiunkt na Wydziale Mechaniczno-Elektrycznym Akademii Marynarki Wojennej.

e-mail: A.Cwalina@amw.gdynia.pl

