

## **Preliminary investigations of a generating set of the ship's power station in the aspect of diagnosing selected parts of its constructional structure**

*Abstract: In the paper the research problem and some results of preliminary investigations of a generating set of the ship's power plant are presented. The main purpose of the examinations was to develop a non-invasive method of evaluation technical conditions of selected structural elements of an undercharged diesel engine that was not equipped with indicator valves. The developed method is based on measurements of diesel engine exhaust gas pressure in exhaust manifold and phase-to-phase voltage of the synchronous generator driven by the engine, at the same time. Measured energetic parameters were synchronized with the cycle of the engine operation by means of a vibration signal coming from one of its injectors. It was found out that diesel engine technical condition exerts significant influence on generated electric power quality.*

*Key words: generating set, marine internal combustion engine, diagnostics*

### **Badania wstępne zespołu prądowłórczego elektrowni okrętowej w aspekcie diagnozowania wybranych elementów jego struktury konstrukcyjnej**

*Streszczenie: W referacie przedstawiono program oraz wyniki badań wstępnych, których celem jest opracowanie bezinwazyjnej metody oceny stanu technicznego wytypowanych elementów struktury konstrukcyjnej tłokowego silnika spalinowego niedoładowanego, nie wyposażonego przez producenta w zawory indykatorowe.*

*Opracowywana metoda polega na jednoczesnych pomiarach ciśnienia spalin w kanale wylotowym oraz napięć międzyfazowych prądnicy synchronicznej współpracującej z silnikiem. Mierzone parametry energetyczne zostały zsynchronizowane z cyklem roboczym silnika za pomocą sygnału drganiowego pozyskanego z wtryskiwacza. Stwierdzono, że stan techniczny silnika ma znaczący wpływ na jakość wytwarzanej energii elektrycznej.*

*Słowa kluczowe: silnik okrętowy, diagnostyka, zespół prądowłórczy*

#### **1. Wstęp**

Jednym z ważnych problemów badawczych podejmowanych na Wydziale Mechaniczno-Elektrycznym Akademii Marynarki Wojennej jest opracowanie bezinwazyjnej metody diagnozowania wybranych elementów struktury konstrukcyjnej okrętowych tłokowych silników spalinowych nie wyposażonych standardowo w zawory indykatorowe. Metoda taka, polegająca na jednoczesnych pomiarach ciśnienia w przekrojach kontrolnych kanału łączącego cylindry silnika z turbiną turbosprężarki, powstała na potrzeby silników doładowanych pulsacyjnie [2, 3]. Pozwoliło to na wyznaczenie następujących parametrów diagnostycznych:

- strumieni entalpii spalin w kanałach łączących cylindry silnika z turbiną turbosprężarki z możliwością określenia wpływu procesów gazodynamicznych zachodzących w poszczególnych cylindrach,
- prędkości przemieszczania się szczytowej amplitudy fali ciśnienia spalin w kanale wylotowym,
- stosunku amplitud ciśnienia spalin harmonicznej podstawowej do harmonicznej odpowiadającej liczbie cylindrów połączonych z danym kanałem przepływowym.

Wybrane parametry diagnostyczne pozwoliły na wczesną identyfikację i lokalizację szeregu stanów niesprawności silnika. Przydatność tej metody oceny stanu technicznego silnika okrętowego została potwierdzona w trakcie badań realizowanych na potrzeby Marynarki Wojennej [2, 6]. Skłoniło to autorów artykułu do podjęcia badań mających na celu określenie stanu technicznego wybranych elementów okrętowego zespołu prądowłórczego złożonego z niedoładowanego silnika LEYLAND typu SW400 oraz trójfazowej prądnicy synchronicznej. Silniki te nie są wyposażone przez producenta w zawory indykatorowe.

Do tej pory nie opracowano skutecznej metody parametrycznej oceny stanu technicznego okrętowego silnika pomocniczego nie wyposażonego w zawory indykatorowe. Uniemożliwia to zastosowanie strategii eksploatacji zespołów prądowłórczych według ich stanu technicznego; stosowana jest jedynie strategia eksploatacji według resursu godzinowego [1].

#### **2. Opis stanowiska badawczego**

Obiektem badań jest zespół prądowłórczy ZE400/52, wyposażony w silnik LEYLAND typu SW400 oraz trójfazową prądnicę synchroniczną typu GCPf-94c/1, zainstalowany w laboratorium

na Wydziale Mechaniczno-Elektrycznym Akademii Marynarki Wojennej jako element elektrowni okrętowej. Silnik typu SW400 jest czterosuwowym, sześciocylindrowym, rzędowym, niedoładowanym silnikiem pomocniczym.

Widok zespołu prądowłórczego typu ZE400/52 zainstalowanego na stanowisku laboratoryjnym przedstawiono na rysunku 1, natomiast jego podstawowe dane techniczne w tabeli 1.



Rys. 1. Widok ogólny morskiego zespołu prądowłórczego ZE400/52 na stanowisku laboratoryjnym

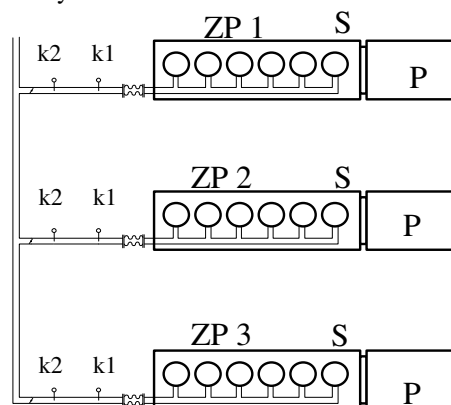
Tabela 1. Charakterystyka techniczna silnika typu SW400 [7]

Moc znamionowa	54,06 kW	Rodzaj wtrysku	Bezpośredni
Znamionowa prędkość obrotowa	1500 min <sup>-1</sup>	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	10 <sup>0</sup> przed GMP
Objętość skokowa	6540 cm <sup>3</sup>	Zamknięcie zaworu dolotowego	50 <sup>0</sup> po DMP
Stopień sprężania	16	Początek otwarcia zaworu wylotowego	46 <sup>0</sup> przed DMP
Ciśnienie sprężania	1,96 MPa	Zamknięcie zaworu wylotowego	14 <sup>0</sup> po GMP

Stanowisko laboratoryjne zostało wyposażone w trzy zespoły prądowłórcze typu ZE400/52, mogące pracować niezależnie bądź synchronicznie na wspólną sieć. Spaliny z silników kierowane są do wspólnego kanału zbiorczego (rys. 2).

Nominalna, stała prędkość obrotowa wału korbowego silnika wynosząca 1500 min<sup>-1</sup>, odpowiada częstotliwości generowanego przez prądnicę napięcia  $f=50$  Hz. Obciążenie silnika można zmieniać za pomocą załączania odbiorów energii elektrycznej (rezystorów powietrznych). Pozwalają one na odbiór mocy w zakresie  $0 \div 25$  kW.

Schemat układu spalin wylotowych silników zainstalowanych na stanowisku laboratoryjnym pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat układu spalin wylotowych zespołów prądowłórczych zainstalowanych w laboratorium: S – silnik, P – prądnicą, ZP – zespół prądowłórczy, 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  $\pm 10V$ ,  $\pm 5V$ ,  $\pm 2.5V$ ,  $\pm 1.25V$ ,  $\pm 0.625V$ ; zakresy wyjściowe  $\pm 10V$ ,  $\pm 5V$ ,  $0 \div 10V$ ,  $0 \div 5V$ ; z rozdzielczością 12 bitów oraz z częstotliwością próbkowania do 150 kS/s, posiadający interfejs USB 2.0. Z modulem współpracuje zaprojektowany i wykonany na potrzeby prowadzonych badań przetwornik wielkości mierzonych typu PWM-2010 (rys. 3). Dostosowuje on parametry sygnałów z czujników do możliwości karty pomiarowej. Umożliwia to bezpieczne pomiary napięć międzyfazowych prądnicy – 400 V poprzez odizolowanie galwaniczne od przyrządu pomiarowego. Przyrząd może współpracować z przetwornikami ciśnienia OPTRAND typu C11294-Q oraz akcelerometrami typu KD35 lub Brüel & Kjaer typu 4384.



Rys. 3. Aparatura pomiarowa wykorzystywana w badaniach: 1 – komputer, 2 – karta pomiarowa, 3 – przetwornik wielkości mierzonych

## 4. Plan realizacji badań

Postanowiono, że badania będą prowadzone dla stanów pracy ustalonej. Na wstępie przyjęto wszystkie wartości parametrów wejściowych. Parametry te dobrano na podstawie analizy logicznej struktury konstrukcyjnej oraz warunków pracy zespołu prądotwórczego. W prowadzonych badaniach zastosowano więc statyczny plan zdeterminowany, gdzie parametrami wejściowymi są: obciążenie silnika oraz stan techniczny silnika. Ze względów praktycznych przyjęto plan selekcyjny drugiego stopnia z ograniczoną liczbą wartości parametrów wejściowych [5]. Ustalono wartości obciążenia silnika momentem obrotowym odpowiadające pracy na biegu luzem oraz obciążeniu prądnicy mocą 20 kW i dodatkowo - 10 kW. Drugim parametrem wejściowym jest stan techniczny zespołu prądotwórczego. Założono dwa odmienne stany: stan pełnej zdadności technicznej zespołu oraz częściowej zdadności technicznej [1], polegający na odłączeniu zasilania paliwem jednego z cylindrów (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

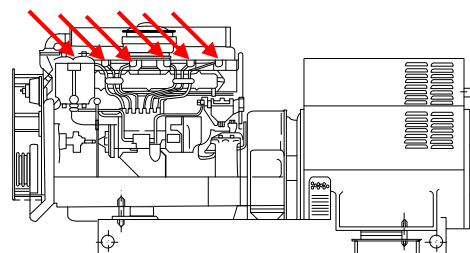


Rys. 4. Widok instalacji paliwowej silnika typu SW400 umożliwiającej odcięcie dopływu paliwa do wybranego wtryskiwacza

Do pomiarów wytypowano następujące parametry energetyczne zespołu prądotwórczego:

- wartości napięć międzyfazowych prądnicy (za regulatorem napięcia) [4],
- wartości pulsacji ciśnień spalin w dwóch przekrojach kontrolnych kanału spalin wylotowych,
- wartości przyspieszeń drgań wtryskiwaczy poszczególnych cylindrów silnika,

Punkty pomiaru poszczególnych parametrów energetycznych zostały przedstawione na rysunkach: 2, 5 i 6.



Rys. 5. Schemat zespołu prądotwórczego z zaznaczonymi miejscami pomiaru przyspieszeń drgań wtryskiwaczy [7]



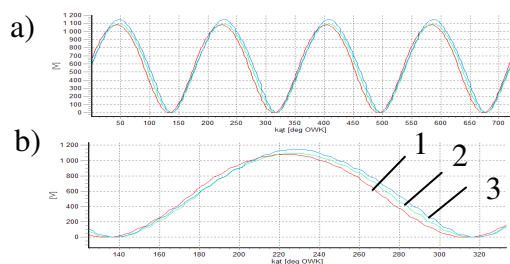
Rys. 6. Regulator napięcia prądnicy z zaznaczonymi miejscami pomiaru napięć międzyfazowych

Pomiar wartości ciśnienia w przekrojach kontrolnych kanału wylotu spalin z silnika pozwala na określenie dysponowanego strumienia entalpii spalin generowanych przez cylindry silnika, prędkości przemieszczania się szczytowej amplitudy ciśnienia spalin w kanale oraz na przeprowadzenie analizy widmowej zarejestrowanego sygnału [3]. Analiza przebiegów ciśnienia jako funkcji czasu zwłaszcza w aspekcie określania strumieni entalpii spalin jest kłopotliwa, znacznie wygodniejsza jest analiza tych przebiegów jako funkcji kąta obrotu wału korbowego. Aby było to możliwe konieczne jest znalezienie parametru powtarzającego się okresowo (synchronizującego) z okresem  $T$  równym czasowi trwania cyklu roboczego silnika. Parametrem spełniającym postawiane wymagania są przyspieszenia drgań mierzone na wtryskiwaczach silnika. Pozwoliły one na przekształcenie wszystkich mierzonych parametrów będących funkcją czasu na funkcję kąta obrotu wału korbowego (uśrednianie synchroniczne). Ponadto przyspieszenia drgań mierzone na wtryskiwaczach pozwalają na precyzyjne określenie średniej prędkości obrotowej wału korbowego silnika w czasie trwania cyklu roboczego.

## 5. Wyniki prowadzonych badań

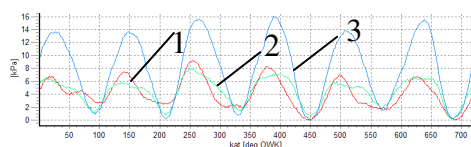
Pomiary parametrów energetycznych zespołu prądotwórczego przeprowadzono zgodnie z planem realizacji badań. Reprezentatywne wyniki dla stanu pełnej zdadności technicznej silnika przedstawiono na rysunkach:

- rysunek 7 – przebieg napięcia międzyfazowego jako funkcji kąta obrotu wału korbowego,
- rysunek 8 - przebieg ciśnienia spalin w przekroju kontrolnym  $k_1$  jako funkcji kąta obrotu wału korbowego,
- rysunek 9 – przebieg ciśnienia w przekrojach kontrolnych  $k_1$  i  $k_2$  jako funkcji kąta obrotu wału korbowego,
- rysunek 10 – widmo amplitudowe napięcia międzyfazowego.

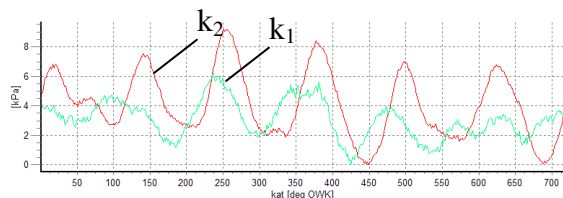


Rys. 7. Przebieg napięcia międzyfazowego jako funkcji kąta obrotu wału korbowego

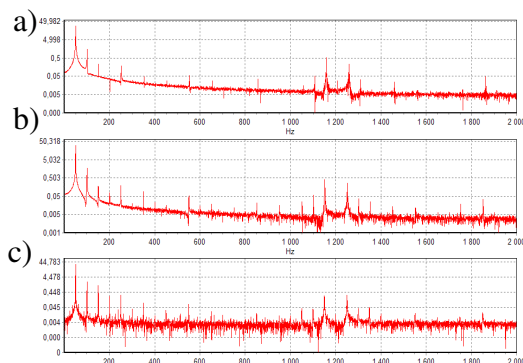
a) dla cyklu roboczego silnika, b) wycinek cyklu roboczego silnika, 1- bieg luzem, 2 – obciążenie 10 kW, 3 – obciążenie 20 kW



Rys. 8. Przebieg ciśnienia spalin w przekroju kontrolnym  $k_2$  jako funkcji kąta obrotu wału korbowego: 1 – bieg luzem, 2 – obciążenie 10 kW, 3 – obciążenie 20 kW



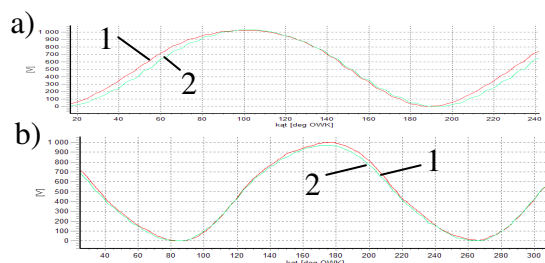
Rys. 9. Przebieg ciśnienia spalin w przekrojach kontrolnych  $k_1$  i  $k_2$  jako funkcji kąta obrotu wału korbowego



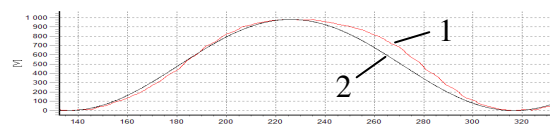
Rys. 10. Widmo amplitudowe napięcia międzyfazowego: a) na biegu luzem, b) obciążenie 10 kW, c) obciążenie 20kW

Wyniki prowadzonych badań dla stanu pełnej i częściowej zdatości technicznej silnika przedstawiono na rysunkach:

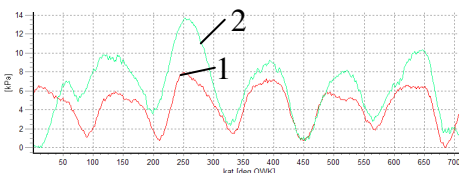
- rysunek 11 – przebieg napięcia jako funkcji kąta obrotu wału korbowego (wycinek cyklu roboczego silnika),
- rysunek 12 – przebieg napięcia jako funkcji kąta obrotu wału korbowego z naniesionym przebiegiem teoretycznym (wycinek cyklu roboczego silnika),
- rysunek 13 – przebieg ciśnienia w przekroju kontrolnym  $k_2$  jako funkcji kąta obrotu wału korbowego,
- rysunek 14 – widmo amplitudowe zarejestrowanego sygnału napięcia międzyfazowego,
- rysunek 15 – widmo amplitudowe ciśnienia w przekroju kontrolnym  $k_1$ .



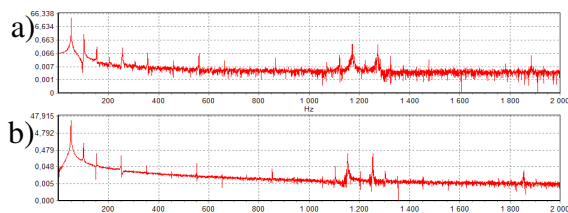
Rys. 11. Przebieg napięcia międzyfazowego jako funkcji kąta obrotu wału korbowego: a) dla biegu luzem, b) dla obciążenia 20 kW: 1 – dla stanu pełnej zdatości technicznej silnika, 2 – dla stanu częściowej zdatości technicznej silnika



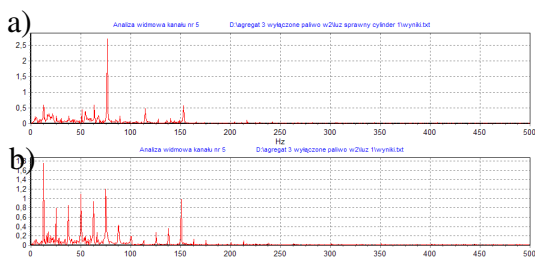
Rys. 12. Przebieg napięcia międzyfazowego jako funkcji kąta obrotu wału korbowego dla stanu częściowej zdatości technicznej i dla biegu luzem: 1 – przebieg uzyskany z pomiarów, 2 – przebieg teoretyczny



Rys. 13. Przebieg ciśnienia spalin w przekroju  $k_2$  jako funkcji kąta obrotu wału korbowego (obciążenie 10 kW): 1 – silnik w stanie pełnej zdatości technicznej, 2 – silnik w stanie częściowej zdatości technicznej



Rys. 14. Widmo amplitudowe napięcia międzyfazowego (obciążenie 20 kW): a) silnik w stanie pełnej zdadności technicznej, b) silnik w stanie częściowej zdadności technicznej



Rys. 15. Widmo amplitudowe pulsacji ciśnienia spalin w przekroju kontrolnym  $k_1$  kanału wylotu spalin (obciążenie 20 kW): a) silnik w stanie pełnej zdadności technicznej, b) silnik w stanie częściowej zdadności technicznej

Przebiegi napięć międzyfazowych zostały przesunięte o wartość amplitudy.

## 6. Podsumowanie

Wyniki badań przedstawione w artykule stanowią wstęp do opracowania bezinwazyjnej metody oceny stanu technicznego zespołów prądotwórczych, których silniki nie są standardowo wyposażone w zawory indykatorowe. Analiza danych liczbowych zaprezentowanych na przebiegach poszczególnych parametrów kontrolnych pozwala wnioskować, że zmiany parametrów są funkcją zarówno stanu technicznego zespołu prądotwórczego jak i stopnia jego obciążenia momentem obrotowym. Obserwacja ta uzasadnia dalsze prowadzenie badań, co powinno pozwolić na znalezienie relacji diagnostycznych pomiędzy stanem technicznym zespołu prądotwórczego a zmianami poszczególnych parametrów energetycznych. W konsekwencji powinno to pozwolić na wyodrębnienie zespołu parametrów diagnostycznych jednoznacznie identyfikujących stan techniczny zespołu.

## Nomenclature/Skróty i oznaczenia

P Generator/prądnicza

ZSE Generating set/zespół prądotwórczy

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 wewnątrzcyklindrowych na podstawie wyników badania procesów gazodynamicznych w układzie turbodoładowania, opracowanie w ramach projektu badawczego MNiSW nr: 0T00B02129, 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] 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.
- [5] Polański, Z.: Planowanie doświadczeń w technice, PWN, Warszawa 1984.
- [6] Zacharewicz M.: Metoda diagnozowania przestrzeni roboczych silnika okrętowego na podstawie parametrów procesów gazodynamicznych w kanale zasilającym turbosprężarkę, rozprawa doktorska, Gdynia 2009.
- [7] Dokumentacja Techniczna Zespołu Prądotwórczego 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

