

**ZESZYTY NAUKOWE NR 1(73)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Stanisław Bruski, Zbigniew Korczewski

**Metoda diagnozowania
okrętowego tłokowego silnika spalinowego
na podstawie analizy widmowej drgań skrętnych linii wałów**

Słowa kluczowe: diagnostyka, silnik okrętowy, układ zasilania paliwem,
drgania skrętne, analiza widmowa

Prezentowane wyniki pomiarów drgań skrętnych linii wałów napędzanych przez średnioobrotowy silnik spalinowy typu Sulzer serii AL. Celem badania było sprawdzenie możliwości diagnozowania tłokowego silnika spalinowego zespołu napędowego okrętu na podstawie analizy widmowej drgań skrętnych linii wałów. W wyniku przeprowadzonych badań zaproponowano przyjęcie nowej miary diagnostycznej przydatnej w ocenie stanu technicznego silnika.

**Diagnostic Method of the Marine Diesels Engine Fuel Feed
System Based on Spectral Analysis of Propulsion Shafts
Torsional Vibrations**

Key words: diagnosis, marine diesel engine, fuel feed system,
torsional vibrations, spectrum analysis

The paper presents selected results of torsional vibration measurements of propulsion shafts driven by a medium-speed Sulzer-made marine diesel engine of AL type. The research aimed to find out whether it is possible to diagnose failures of the fuel feed system by means of torsional vibration spectral analysis. The research resulted in the authors' proposal of a new diagnostic measure.

Wprowadzenie

Podstawowa działalność badawcza Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów AMW rozwijana nieprzerwanie od 1982 roku to diagnostyka silników turbinowych i tłokowych. Owocem badań zespołów kierowanych przez prof. Adama Charchalisa oraz dr. inż. Stanisława Połanowskiego było wdrożenie w 1992 roku bazowego systemu diagnostycznego do eksploatacji silników zainstalowanych na okrętach marynarki wojennej. W przypadku silników tłokowych systemem diagnostycznym zostały objęte tylko te silniki okrętowe, które standardowo są wyposażone w zawory indykatorowe.

Głównym celem aktualnie podejmowanych w instytucie badań naukowych, prowadzonych pod kierunkiem Zbigniewa Korczewskiego (współautora niniejszego artykułu) jest gruntowna modernizacja i dalsze rozwinięcie funkcjonującego dotychczas wypróbowanego systemu diagnostycznego o elementy kontroli podstawowych układów funkcjonujących silników tłokowych, a w szczególności układu tłokowo-cylindrowego przy braku możliwości indykowania cylindrów. Takie właśnie silniki zostały w ostatnim okresie wdrożone do eksploatacji w marynarce wojennej (M401, Detroit Diesel, Mercedes Benz).

W pracy badawczej, której częściowe wyniki zawarte są w artykule, opracowano oryginalny projekt stanowiska pomiarowego do badań procesów spalania paliwa w cylindrach silnika, opartego na pomiarach momentu skręcającego linii wałów okrętowych. Istotą pracy jest określenie zależności pomiędzy zmianami stanu technicznego układu TPC oraz dawkowaniem paliwa a przebiegiem zmienności momentu obrotowego mierzonego na linii wałów okrętowych.

Podstawą zaproponowanej metody diagnostycznej jest odpowiednio zsyntezowana analiza harmoniczných zawartych w widmie momentu obrotowego transmitowanego przez linię wałów okrętowych. Metoda jest aktualnie weryfikowana na okrętowych układach napędowych o różnej konfiguracji.

1. Drgania skrętne w okrętowych zespołach napędowych

Uzyskane wyniki pomiarów drgań skrętnych linii wałów okrętowych są materiałem wyjściowym do dalszej „obróbki” matematycznej celem uzyskania ilościowych relacji diagnostycznych typu defekt – symptom jako podstawy do przeprowadzenia wnioskowania diagnostycznego o stanie technicznym silnika napędu głównego okrętu. Wstępne badania podatności diagnostycznej tego typu silników zostały przedstawione w pracy [4]. Zaobserwowano, że nowe możliwości pozyskania informacji diagnostycznej leżą w wykorzystaniu parametrów widma drgań skrętnych linii wałów z zastosowaniem szybkiej transformaty

Fouriera. Drgania skrętne niosą wiele informacji zarówno o jakości spalania w cylindrach, jak i udziale poszczególnych cylindrów silnika w sumarycznej wartości wytwarzanego momentu obrotowego [1, 2, 3]. Całkowity kąt skręcenia wału $\varphi(\tau)$ zależy od odkształceń „statycznych” $\varphi_{st}(\tau)$, spowodowanych pulsacyjnym przebiegiem wymuszającego momentu obrotowego i od odkształceń „dynamicznych” $\varphi_{dyn}(\omega, \tau)$ będących efektem drgań skrętnych. Relacje te wyraża następująca formuła:

$$\varphi(\tau) = \varphi_{st}(\tau) + \varphi_{dyn}(\omega, \tau) \quad (1)$$

W procesie eksploatacji okrętu, wskutek nieuniknionych i nieodwracalnych procesów zużywania się elementów konstrukcyjnych silników napędowych, jak również śrub napędowych, zawsze towarzyszących eksploatacji w warunkach morskich, zmieniają się charakterystyki dynamiczne zespołu napędowego. Z przeprowadzonych badań wstępnych wynika, że analiza harmoniczna zmian momentu skręcającego linii wałów może stanowić istotne źródło informacji diagnostycznej o stanie technicznym silnika napędowego oraz pędnika okrętowego [4, 5, 6].

W dalszej części artykułu przyjęto, że pod pojęciem „obrót wału korbowego” rozumie się wartość 360° dla silnika dwusuwowego oraz 720° dla silnika czterosuwowego. Dane uzyskane w eksperymencie badawczym zostały zebrane w równych odcinkach czasu. Są okresowe i ciągłe – umożliwiają zatem zastosowanie analizy widmowej [6]. W analizie tej najmniejsza częstotliwość jest nazywana częstotliwością podstawową (rzadziej pierwszą harmoniczną), a większe częstotliwości, które są całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości podstawowej, są nazywane harmonicznymi. Zmiany chwilowego momentu skręcającego linii wałów jako funkcji okresowej mogą być opisane szeregiem trygonometrycznym:

$$y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n \cos\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) + B_n \sin\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) \right] \quad (2)$$

gdzie:

- A_0 – składowa stała sygnału,
- T – okres sygnału (czas jednego pełnego cyklu),
- $n = 1, 2, 3, \dots$ – numer kolejnej harmoniczej.

Składowe harmoniczne momentu chwilowego generowanego w poszczególnych cylindrach można zsumować uwzględniając fazę ich występowania. Biorąc pod uwagę rodzaj silnika (liczba suwów) oraz liczbę cylindrów można zauważyć, że procesy spalania w poszczególnych cylindrach będą miały miejsce

w równych odstępach kątowych obrotu wału korbowego wynoszących odpowiednio:

$$\Delta\alpha = 2\pi \frac{k}{i} \quad (3)$$

gdzie:

$k=1$ dla silnika dwusuwowego, $k=2$ dla silnika czterosuwowego,
 i – liczba cylindrów.

Natomiast odniesione do wału napędowego odpowiednio:

$$\Delta\alpha_w = \frac{\Delta\alpha}{x} \quad (4)$$

gdzie:

x – przełożenie przekładni redukcyjnej.

Do dalszych rozważań przyjęto następujący system oznaczeń:

A_{xy} – amplituda harmonicznej ciśnienia – składowa rzeczywista,

B_{xy} – amplituda harmonicznej ciśnienia – składowa urojona,

$x = 1, 2, 3, \dots i$ – numer rozpatrywanego cylindra,

$y = 1, 2, 3, \dots n$ – rząd harmonicznej.

I tak szereg Fouriera dla badanego układu napędowego i pierwszego cylindra z pominięciem składowej stałej przybierze postać:

$$y_1(t) = A_{11} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + B_{11} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + A_{12} \cos\left(2\frac{2\pi}{T}t\right) + B_{12} \sin\left(2\frac{2\pi}{T}t\right) + \\ + A_{13} \cos\left(3\frac{2\pi}{T}t\right) + B_{13} \sin\left(3\frac{2\pi}{T}t\right) + A_{14} \cos\left(4\frac{2\pi}{T}t\right) + B_{14} \sin\left(4\frac{2\pi}{T}t\right) + \dots$$

Natomiast dla j -tego cylindra (w kolejności spalania) i n -tej harmonicznej:

$$y_j(t) = \dots + A_{jn} \cos\left(n\left(\frac{2\pi}{T}t + (j-1)\Delta\alpha_w\right)\right) + B_{jn} \sin\left(n\left(\frac{2\pi}{T}t + (j-1)\Delta\alpha_w\right)\right) + \dots \quad (5)$$

Wynika stąd, że chwilowy moment skręcający linii wałów można opisać następującą zależnością:

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) + \dots + y_j(t) + \dots + y_i(t) \quad (6)$$

Korzystając z podstawowych funkcji trygonometrycznych można wykazać, że dla równości amplitud:

$$A_{1y} = A_{2y} = A_{3y} = \dots = A_{iy} \quad (7)$$

$$B_{1y} = B_{2y} = B_{3y} = \dots = B_{iy} \quad (8)$$

widmo częstotliwości będzie zawierało tylko częstotliwości harmoniczne, będące wielokrotnością liczby cylindrów. Dla silnika 6AL20/24 będą to harmoniczne: 6, 12, itd. W przypadku kiedy wystąpią nierówności amplitud, wynikające np. z wadliwej pracy układu zasilania silnika paliwem – w widmie częstotliwości pojawią się pozostałe harmoniczne.

W pracy [5] zaproponowano przyjęcie miary diagnostycznej, charakteryzującej stan techniczny układu zasilania paliwem silnika napędowego o uogólnionej postaci:

$$SW_H = \frac{H_1}{H_i} \quad (9)$$

gdzie:

- SW_H – selektywny współczynnik zawartości harmonicznych,
- H_1 – wartość amplitudy częstotliwości podstawowej w widmie sygnału,
- H_i – wartość amplitudy i -tej harmonicznej,
- i – liczba cylindrów silnika.

2. Metoda diagnozowania silnika

Pomiar kąta chwilowego skręcenia wału śrubowego realizuje się za pomocą zestawu składającego się z następujących elementów:

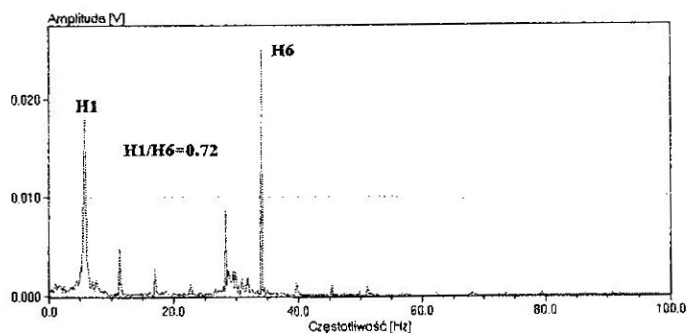
- mostka tensometrycznego;
- aparatury służącej do transmisji wartości kąta skręcenia wału śrubowego z linii wałów;
- rejestratora cyfrowego do pomiarów wielkości szybkozmiennych, służącego do archiwizacji zmierzonych wartości kąta chwilowego skręcenia wału śrubowego.

Rejestracji parametrów dokonuje się w szerokim zakresie zmian obciążenia silnika, zdeterminowanego prędkością obrotową wału śrubowego i nastawą

skoku śruby napędowej. Pomiar wykonuje się podczas bezwietrznej pogody i przy stanie morza 0 – 1.

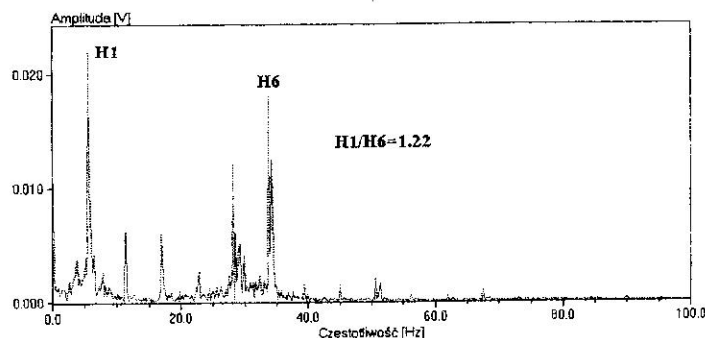
Na podstawie dotychczasowych badań [4, 5] można stwierdzić, że przy stałej prędkości obrotowej linii wałów i obciążeniu zmieniającym się od wartości minimalnej do wartości maksymalnej, charakter widma drgań skrętnych nie ulega zmianie. Upraszcza to algorytm dalszej „obróbki” matematycznej. Postępowanie zgodne z metodyką opracowaną w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów AMW prowadzi do otrzymania wyników jak niżej. Pomiar został wykonany na jednym z holowników Marynarki Wojennej RP.

Porównanie wartości przyjętego współczynnika ocenowego SW_H osiągającego wartości zbliżone do ~ 1 dla silnika w stanie pełnej zdatości technicznej (rys. 1, 2), które w stanie dysfunkcji układu zasilania paliwem (rys. 3) dochodzące do wartości ~ 17 , daje możliwość przeprowadzenia wnioskowania diagnostycznego o stanie technicznym silnika. Zaproponowany współczynnik zawartości harmonicznych SW_H umożliwia w tym przypadku określenie poprawności funkcjonowania układu zasilania silnika paliwem, którego niesprawności, jak wykazuje praktyka eksploatacyjna w zakresie silników stosowanych w MW RP, stanowią ponad 70% wszystkich niesprawności mających wpływ na jakość spalania paliwa w cylindrach. Dla układu będącego w stanie pełnej zdatości technicznej wartości SW_H osiągają zdecydowanie wartości minimalne, praktycznie niezależne od zakresu prędkości obrotowej wału korbowego silnika napędowego. Każda różnica w pracy dowolnego z układów cylindrowych, mająca swoje odbicie w różnicy maksymalnego ciśnienia spalania pomiędzy układem cylindrowym pracującym wadliwie, a pozostałymi układami cylindrowymi, przekłada się na wartość omawianego współczynnika ocenowego.



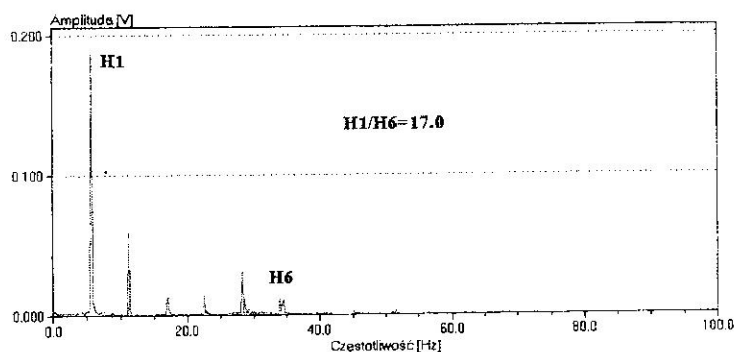
Rys. 1. Widmo drgań skrętnych wału śrubowego dla prędkości obrotowej wału korbowego silnika 680 min^{-1} ; nastawa skoku śruby napędowej -0° ($SW_H = 0,72$)

Fig. 1. FFT spectrum of torsional vibration measured on propeller shaft at engine rpm = 680 and the adjustable pitch propeller setting = 0 deg. (Harmonic measure $SW_H = 0.72$)



Rys. 2. Widmo drgań skrętnych wału śrubowego dla prędkości obrotowej wału korbowego silnika 700 min⁻¹; nastawa skoku śruby napędowej – 17° ($SW_H = 1,22$)

Fig. 2. FFT spectrum of torsional vibration measured on propeller shaft at engine rpm = 700 and the adjustable pitch propeller setting = 17 deg. (Harmonic measure $SW_H = 1.22$).



Rys. 3. Widmo drgań skrętnych wału śrubowego dla prędkości obrotowej wału korbowego silnika 700 min⁻¹; nastawa skoku śruby napędowej – 17° ($SW_H = 17,0$). Zakłócenia procesu spalania w cylindrze nr 1

Fig. 3. FFT spectrum of torsional vibration measured on propeller shaft at engine rpm = 700 and the adjustable pitch propeller setting = 17 deg. (Harmonic measure $SW_H = 17.0$). There are combustion disturbances in cyl. No 1.

Kolejną zaletą opracowanej metody diagnozowania silnika jest łatwość pozyskiwania niezbędnych danych pomiarowych w systemach monitorujących. Pomiar w czasie rzeczywistym chwilowego skręcenia linii wałów pozwalający na określenie chwilowego momentu skręcającego, analiza FFT otrzymanego sygnału, określenie selektywnego współczynnika zawartości harmoniczných, a co za tym idzie określenie stanu technicznego układu zasilania silnika paliwem dobrze prognozuje dalsze wykorzystanie metody w rutynowych badaniach diagnostycznych silników okrętowych szczególnie w sytuacji, gdy nie są one standardowo wyposażone w zawory indykatorowe.

Wnioski

W artykule zaproponowano przyjęcie metody diagnostycznej przydatnej w ocenie stanu technicznego układów cylindrowych i dającej informację o przebiegu procesu spalania paliwa w cylindrach nie wyposażonych standardowo w zawory indykatorowe.

Uzyskane wyniki zachęcają do prowadzenia dalszych badań eksperymentalnych w zakresie wpływu regulacji układu zasilania silnika na widmo amplitudowe drgań skrętnych linii wałów.

Literatura

1. Bielawski P., *Transfer function of a cranked engine shaft*, Explo-Diesel & Gas Turbine '01, Gdańsk-Międzyzdroje-Kopenhaga, April 23-27, 2001.
2. Bonnier J.S., Tromp C.A.J., Klein-Woud J., *Decoding torsional vibration recordings for cylinder process monitoring*, CIMAC Copenhagen 1998.
3. Borkowski W., Pięta A., Jakubczak M., *Ocena stanu sprawności technicznej silnika z zapłonem samoczynnym na podstawie analizy drgań skrętnych wału korbowego*, Kongres Diagnostyki Technicznej, Gdańsk 1996.
4. Bruski S., Lus T., Łutowicz M., Korczewski Z., *Preliminary tests of torque and torsional vibration within propulsion system powered by medium-speed marine diesel engine*, II International Scientifically-Technical Conference Explo-Diesel & Gas Turbine '01 Gdańsk-Międzyzdroje-Kopenhaga April 23-27, 2001, s. 53 – 59.
5. Bruski S., Korczewski Z., *Wyniki badań stanowiskowych wpływu wybranych uszkodzeń w układzie paliwowym okrętowego tłokowego silnika spalinowego na widmo drgań skrętnych linii wałów*, Zeszyty Naukowe AMW, nr 2/2003.
6. Tromp C.A.J., Spoelstra J.M., Klein-Woud J., *Torsional vibration analysis as a tool for condition monitoring of piston engines by on-line cylinder torque estimation*, CIMAC Copenhagen 1998.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

dr hab. inż. Piotr Bielawski, prof. AM

dr hab. inż. Oleh Klyus, prof. AM

Adresy Autorów

mgr inż. Stanisław Bruski

dr hab. inż., kmdr Zbigniew Korczewski, prof. AMW

Akademia Marynarki Wojennej, Instytut Technicznej Eksploatacji Okrętów
ul. Śmidowicza 69, 81-103 Gdynia