

Andrzej Grządziela
Marcin Kluczyk
Akademia Marynarki Wojennej

ANALIZA PORÓWNAWCZA CHARAKTERYSTYK DRGANIOWYCH ZEWNĘTRZNYCH LINII WAŁÓW OKRĘTU PROJEKTU 767

STRESZCZENIE

W artykule zaprezentowano wyniki analizy badań drgań przeprowadzonych na okręcie transportowo-minowym projektu 767. Badania zrealizowano po zakończonym remoncie silników głównych oraz po przeprowadzonych korektach współosiowości elementów linii wałów. Przeprowadzona analiza umożliwia wyznaczenie dalszych kierunków badań oraz daje możliwość identyfikacji symptomów jednoznacznie i monotonicznie identyfikujących zmiany parametrów współosiowości lub zmiany stanu technicznego elementów linii wałów.

Słowa kluczowe:

linie wałów okrętowych, diagnostyka techniczna, drgania.

WSTĘP

Celem badań była identyfikacja obiektów, zgromadzenie materiałów pomiarowych i w następstwie ich analizy identyfikacja cech dynamicznych oraz opisanie wartości tolerowanych symptomów drganiowych charakteryzujących dopuszczalny stan techniczny wytypowanych elementów układu napędowego okrętu projektu 767. Należało również wyznaczyć parametry mogące podczas przyszłych badań drganiowych ułatwić identyfikację powstałych uszkodzeń.

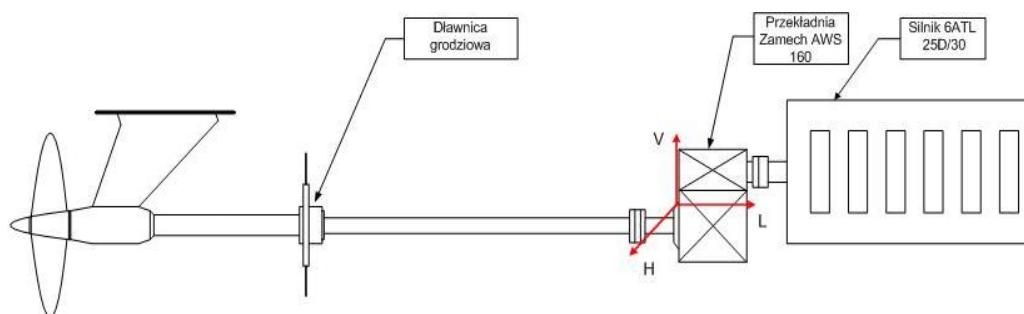
Celem badań było ponadto określenie stopnia poprawności przeprowadzonego remontu oraz ewentualne podanie przyczyn przekroczenia parametrów drganiowych ponad wartości dopuszczalne wynikające z analiz porównawczych i norm.

Ze względu na rodzaj zadań bojowych realizowanych przez okręty projektu 767, do których należy kontrolowane wchodzenie na przybrzeżne płytciny, linie wałów są narażone na wyjątkowo duże obciążenia dynamiczne, a co za tym idzie — wysoce prawdopodobne jest przekroczenie tolerowanych parametrów współosiowości. Diagnostyka drganiowa ich układów napędowych podczas realizacji desantu morskiego jest niezmiernie ważna dla bezawaryjnej eksploatacji jednostki. Należy zaznaczyć, iż rozpatrywana jednostka nie ma stacjonarnego systemu do monitoringu parametrów drganiowych.

Z powodu braku możliwości porównawczych w przypadku środkowej linii wałów w pracy skupiono się na analizie porównawczej zewnętrznych geometrycznie podobnych linii wałów.

OPIS OBIEKTU BADAŃ

Badania realizowano podczas pobytu okrętu projektu 767 na wodach Zatoki Gdańskiej 7 lutego 2011 roku. Wyporność standardowa jednostki wynosi $D = 1745$ t. Głębokość akwenu, na jakim prowadzono badania, przekraczała $h = 20$ m, stan morza wynosił 1–2^B, temperatura powietrza $t_{pow} = 5^{\circ}\text{C}$, temperatura wody $t_w = 2^{\circ}\text{C}$, temperatura w siłowni okrętowej $t_{sil} = 25^{\circ}\text{C}$. Do analizy wybrano dwie linie wałów znajdujące się na prawej i lewej burcie, odpowiednio prawo- i lewoobrotowe. Na rysunku 1. przedstawiono schemat linii wałów. Osie V , H , L oznaczają kierunki pomiarowe. Długość wału od sprzęgła do śruby wynosi $L = 6697,1$ mm, natomiast od punktu pomiarowego do dławnicy $L_p = 1576$ mm. Średnica wału na całej długości jest stała i wynosi $d_w = 135$ mm.



Rys. 1. Linia wałów okrętu projektu 767

Źródło: opracowanie własne.

Zastosowana na okręcie przekładnia redukcyjno-nawrotna Zamech AWS 160 ma przełożenie 2,346:1 i transmituje moment obrotowy od silnika Sulzer 6ATL 25D/30 za pośrednictwem wału do śruby napędowej. Maksymalna prędkość obrotowa silnika głównego wynosi $n = 1050$ [obr/min], a jego moc maksymalna to $N = 1320$ [kW]. Śruba napędowa o skoku stałym i średnicy $d = 1500$ mm wykonana jest z brązu, ma trzy skrzydła i zamontowana jest w dyszy Korta.

CHARAKTERYSTYKA BADAŃ

Jako miejsce montażu akcelerometrów wybrano punkt nad łożyskiem znajdującym się na wyjściu z przekładni redukcyjno-nawrotnej (rys. 2.). Łożysko przekładni jest typu baryłkowego, dwurzędowe o 25 baryłkach w rzędzie (typ 23036ES). Rejestrację sygnałów drganiowych zrealizowano w trzech kierunkach (V , H , L). Sygnały drganiowe rejestrowano przy czterech prędkościach obrotowych silnika, najczęściej stosowanych podczas normalnej eksploatacji okrętu, tj. 700, 800, 900 i 1000 [obr/min]. Pomiary wykonywano po ustabilizowaniu się wartości ciśnień i temperatur dla danej nastawy silnika głównego, tj. po około trzech minutach od uzyskania założonego obciążenia. Do rejestracji przyspieszeń drgań użyto trzech akcelerometrów *Brüel & Kjaer* typu 4514 B oraz kasety pomiarowej typu 3650-B-120. W czasie pomiarów rejestrowano również prędkość obrotową silnika napędowego z użyciem sondy optycznej MM024. W czasie rejestracji sygnałów drganiowych zastosowano częstotliwość próbkowania wynoszącą $f_p = 4096$ Hz, natomiast pasmo analizy ograniczono do $F = 1,6$ kHz.



Rys. 2. Punkt montażu akcelerometrów na kadłubie przekładni Zamech AWS 160

Źródło: zdjęcie wykonane przez autorów.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Odnośząc się do wstępu, należało wyznaczyć cechy identyfikujące parametry drganiowe związane z dynamiką linii wałów. W tym celu w środowisku programu PULSE LabShop firmy B&K przeprowadzono analizę zarejestrowanych sygnałów drganiowych (rys. 3.). Analiza teoretyczna ruchu linii wałów pozwala na jej uproszczony opis macierzowy w postaci równania [1, 5]:

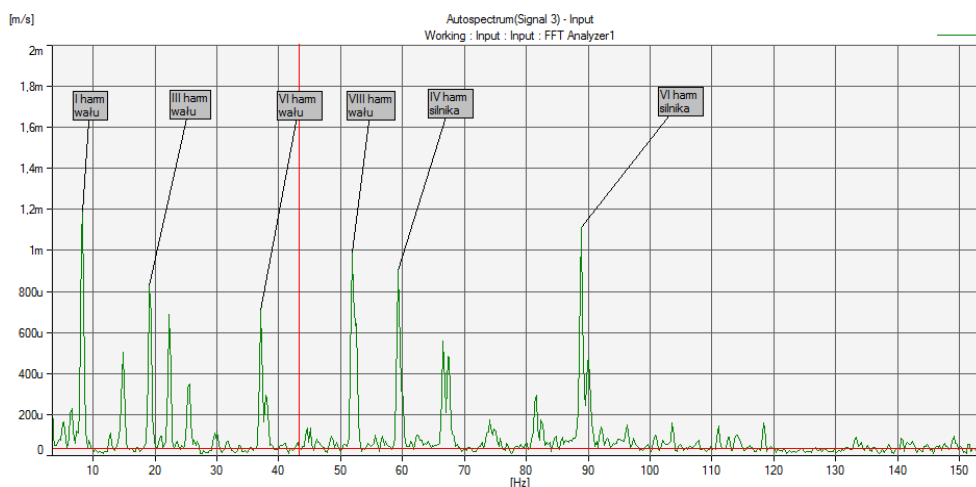
$$M\ddot{\varphi} + C(\dot{\varphi})\dot{\varphi} + k\varphi = M(t), \quad (1)$$

gdzie:

- M — macierz bezwładności;
- C — macierz tłumienia;
- k — macierz sprężystości;
- M — moment sił zewnętrznych.

Jak wynika ze wzoru (1), wartość tłumienia jest zależna od prędkości obrotowej wału, w efekcie czego występują kolejne harmoniczne od prędkości obrotowej. Taka forma równania ruchu wału opisuje jego nieliniowy charakter, co znacząco przybliży założony model teoretyczny do obiektu rzeczywistego.

Podczas analizy poszukiwano kolejnych harmonicznych od prędkości obrotowej silnika (wału na wejściu do przekładni) oraz od prędkości obrotowej wału za przekładnią. Zastosowano liniową skalę prędkości drgań widma amplitudowo-częstotliwościowego (rys. 3.).



Rys. 3. Widmo prędkości drgań lini wałów lewej burty
(prędkość obrotowa wału 379 obr/min), kierunek V

Źródło: opracowanie własne.

W celu określenia stopnia poprawności przeprowadzonego remontu odczytano wartości kolejnych harmonicznych, aż do dziesiątej harmonicznej, dla obu linii wałów we wszystkich zrealizowanych kierunkach pomiarowych, zarówno dla prędkości obrotowej wału, jak i silnika głównego. Tak odczytane wartości stabilizowano i poddano analizie pod kątem ewentualnych sygnałów mogących świadczyć o niewłaściwie wykonanym remoncie. W pracy zamieszczono jedynie część odczytanych wartości (tabela 1.).

Tabela 1. Zestawienie maksymalnych wartości kolejnych harmonicznych od prędkości obrotowej prawego silnika głównego dla płaszczyzny pomiarowej *H*

Kierunek	obr/min	I h	II h	III h	IV h	V h	VI h	VII h	VIII h	IX h	X h
		[mm/s]									
<i>V</i>	694	0,96	0,27	0,52	0,38	0,44	0,5	0,31	0,24	0,1	0,11
	800	0,57	0,3	0,38	0,47	0,41	0,43	0,25	0,1	0,07	0,07
	900	0,71	0,18	0,24	0,66	0,19	0,98	0,09	0,09	0,05	0,08
	955	0,76	0,16	0,05	0,1	0,25	0,11	0,09	0,07	0,09	0,14

Źródło: opracowanie własne.

Sygnałem prawidłowo zamontowanej linii wałów jest dominująca harmoniczna, którą można opisać następującym równaniem [3]:

$$DH = (z_p \cdot n_{LW}) / 60 \text{ [Hz]}, \quad (2)$$

gdzie:

z_p — liczba skrzydeł śruby;

n_{LW} — prędkość obrotowa wału śrubowego.

Uwzględniając zamontowane na jednostce trzyskrzydłowe śruby napędowe, należy uznać, że montaż linii wałów wymaga pewnych poprawek bądź też ułożenia się wału na dławnicy i łożyskach nośnych (pomiaru wykonywane były bezpośrednio po remoncie, okręt pracował wcześniej jedynie w czasie prób na uwięzi). Dominująca pierwsza harmoniczna świadczy o niewyrównoważeniu linii wałów, czego przyczyną mogą być nowe, niewyważone śruby napędowe, zamontowane w czasie remontu, lub ugięcie montażowe wału śrubowego (rys. 3.). Jeżeli chodzi o wysoką wartość VI harmonicznej od prędkości obrotowej silnika (tabela 1. — kierunek *H*, rysunek 3. — kierunek *V*), to jest ona spowodowana siłami bezwładności układów korbowo-tłokowych zastosowanych do napędu sześciocyndrowego silnika głównego. Niemniej jednak

wszystkie zmierzone wartości prędkości drgań mieszczą się zgodnie z normą VDI-2056 w grupie T na poziomie dobrym [5]. Norma ta dla maszyn grupy T jako wartość graniczną dobrego stanu dynamicznego podaje wartość prędkości drgań wynoszącą 2,8 [mm/s].

Po przeprowadzeniu analizy FFT z użyciem programu LabShop (rys. 3.) ograniczono rozpatrywane pasmo częstotliwości do zakresu częstotliwości od I do X harmonicznej dla danej prędkości obrotowej linii wałów. Dalszą analizę prowadzono pod kątem korelacji pomiędzy przebiegami prędkości drgań. Ze względu na różnicę pomiędzy założonymi prędkościami obrotowymi silnika a faktycznie uzyskanymi (odczyt z sygnału pochodzącego z sondy optycznej) konieczne było dobranie odpowiednich narzędzi umożliwiających porównanie harmonicznych występujących, w przypadku obu linii, przy różnych częstotliwościach. Rozbieżności pomiędzy prędkościami obrotowymi dla obu silników głównych zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Rzeczywiste prędkości obrotowe silników głównych i częstotliwości pierwszych harmonicznych od prędkości obrotowej linii wałów

Założona prędkość obrotowa [obr/min]	Uzyskana prędkość obrotowa SG LB/LLW [obr/min]	I harmoniczna lini wałów lewej burty [Hz]	Uzyskana prędkość obrotowa SG PB/PLW [obr/min]	I harmoniczna lini wałów prawej burty [Hz]
700	695/296	4,94	694/296	4,93
800	797/340	5,66	800/341	5,68
900	888/379	6,31	900/384	6,39
1000	983/419	6,98	955/407	6,78

Źródło: opracowanie własne.

Kolejnym etapem analizy było określenie wartości amplitudy prędkości drgań dla częstotliwości harmonicznych (od I do X) od prędkości obrotowej w równych interwałach czasowych. Pomijano tutaj sygnały, których źródłem był silnik napędu głównego. Tak odczytane wartości stabelaryzowano. Następnie uszeregowano w porządku rosnącym w celu określenia zależności współczynnika korelacji dla kolejnych harmonicznych lewej i prawej linii wałów (tabela 3.).

W celu określenia zależności korelacji liniowej Pearsona zastosowano wzór (3).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

gdzie:

$i = 1, 2, 3, \dots, n$

\bar{x} — wartość średnia z pomiarów RMS prędkości drgań lewej linii wałów;

\bar{y} — wartość średnia z pomiarów RMS prędkości drgań prawej linii wałów.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

r_{xy} — współczynnik korelacji liniowej.

W wyniku analizy statystycznej określono współczynniki korelacji (3) pomiędzy obiema analizowanymi liniami wałów z uwzględnieniem trzech kierunków pomiarowych i czterech wartości prędkości obrotowych.

Dla umożliwienia dokonania pełnej i bardziej wiarygodnej oceny zależności pomiędzy odpowiednimi wartościami harmonicznymi prawej i lewej linii wałów obliczono dla nich, posługując się wzorem (4), wartość odchylenia standardowego.

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (4)$$

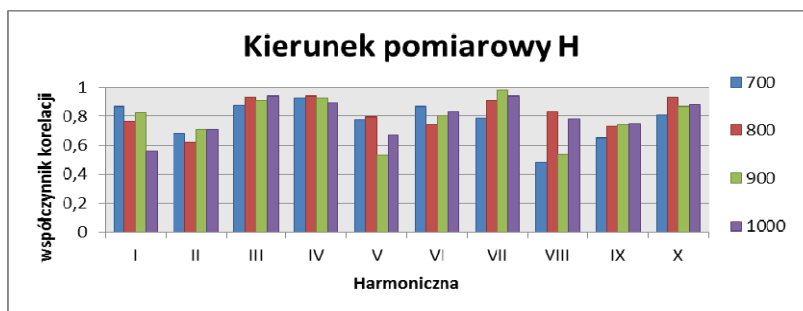
gdzie:

x_i — wartości danej harmonicznej w kolejnych odstępach czasu;

—

\bar{x} — średnia z kolejnych wartości danej harmonicznej;

n — liczba prób.



Rys. 4. Zestawienie wartości współczynników korelacji pomiędzy harmonicznymi lewej i prawej linii wałów dla założonych prędkości obrotowych

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 3. Wartości kolejnych harmonicznych oraz współczynniki korelacji LLW/PLW

Lewa linia wałów $n = 379$ [obr/min]; kierunek pomiarowy H									
I h	II h	III h	IV h	V h	VI h	VII h	VIII h	IX h	X h
0,03	0,08	0,75	0,22	0,06	0,2	0,21	0,08	0,23	0,12
0,05	0,08	0,77	0,23	0,06	0,23	0,22	0,12	0,23	0,12
0,06	0,09	0,79	0,24	0,06	0,26	0,24	0,12	0,24	0,13
0,06	0,09	0,84	0,24	0,06	0,26	0,25	0,12	0,24	0,13
0,06	0,09	0,89	0,26	0,07	0,27	0,25	0,12	0,27	0,14
0,06	0,09	0,91	0,28	0,08	0,28	0,25	0,13	0,27	0,15
0,06	0,1	0,93	0,29	0,09	0,29	0,27	0,13	0,32	0,16
Wartość średnia									
0,054	0,089	0,840	0,251	0,069	0,256	0,241	0,117	0,257	0,136
Odchylenie standardowe									
0,011	0,007	0,072	0,026	0,012	0,031	0,020	0,017	0,033	0,015
Prawa linia wałów $n = 384$ [obr/min]; kierunek pomiarowy H									
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
0,58	0,06	0,64	0,09	0,1	1,26	0,46	0,09	0,06	0,07
0,59	0,06	0,76	0,1	0,12	1,27	0,5	0,09	0,08	0,09
0,6	0,06	0,76	0,1	0,12	1,27	0,53	0,09	0,09	0,09
0,6	0,08	0,77	0,11	0,13	1,27	0,54	0,09	0,1	0,09
0,61	0,08	0,82	0,15	0,13	1,29	0,54	0,1	0,1	0,1
0,61	0,08	0,85	0,15	0,13	1,32	0,54	0,11	0,1	0,1
0,62	0,08	0,87	0,15	0,13	1,33	0,58	0,12	0,11	0,11
Wartość średnia									
0,601	0,071	0,781	0,121	0,123	1,287	0,527	0,099	0,091	0,093
Odchylenie standardowe									
0,013	0,011	0,076	0,027	0,011	0,028	0,038	0,012	0,017	0,013
Współczynnik korelacji lewa linia wałów/prawa linia wałów									
0,827	0,710	0,910	0,931	0,528	0,804	0,983	0,540	0,743	0,867

Źródło: opracowanie własne.

Analogicznie do sposobu przedstawionego w tabeli 3. wykonano analizę współczynników korelacji i odchyłeń standardowych dla wszystkich przeprowadzonych pomiarów. Należy zauważyć, że współczynniki korelacji liniowej mają wartość powyżej 0,5. Wynika stąd fakt silnego związku pomiędzy wartościami amplitud prędkości drgań lewej i prawej linii wałów. Jednak dla ułatwienia identyfikacji przyszłych uszkodzeń należało wybrać te wartości, które świadczą o niemal pełnej korelacji, czyli o wartościach większych niż 0,9 (oznaczone w tabeli kolorem szarym). Przy wyborze kierowano się również możliwie niskimi wartościami odchylenia standardowego, świadczącymi o stałości wartości prędkości drgań dla danej harmonicznej

przez cały czas pomiaru. W ten sposób wybrano harmoniczne od prędkości obrotowej linii wałów, dla których współczynniki korelacji są najwyższe, a odchylenia standardowe najniższe. Są to III, IV oraz VII harmoniczna. Podczas analiz prowadzonych w związku z przyszłymi pomiarami drgań symptomy te należy rozpatrywać jako najbardziej wrażliwe na zmiany stanu technicznego. Należy tu zwrócić uwagę na wysokie wartości współczynnika korelacji LLW/PLW w przypadku trzeciej harmonicznej. Zmiany tego parametru identyfikować mogą uszkodzenia śruby napędowej.

WNIOSKI

Pomimo występowania silnych zależności liniowych konieczne jest podkreślenie faktu występowania znacznych różnic pomiędzy wartościami parametrów drganiowych obu porównywanych linii wałów. Właściwie wykorzystane w czasie analizy sygnałów drganiowych narzędzia statystyczne mogą w znaczny sposób ułatwić identyfikację powstałych uszkodzeń, niemniej nie można w czasie analizy ograniczyć się jedynie do ich stosowania. Będą one bardzo pomocne przy określaniu trendu zmian zachodzących w badanym układzie oraz określeniu przybliżonego czasu wystąpienia przyszłych niesprawności. Należy przy tym zaznaczyć, że pomiary drgań są tylko jednym z elementów wielosymptomowego programu diagnostycznego układu napędowego okrętu projektu 767.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Cempel C., *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*, WNT, Warszawa 1982.
- [2] Grzędziela A., *Metoda diagnozowania okrętowej linii wałów z zastosowaniem zidentyfikowanych modeli dynamicznych*, AMW, Gdynia 2008.
- [3] Grzędziela A., *Analiza możliwości wykorzystania metod drganiowych w diagnozowaniu okrętowej linii wałów*, „Przegląd Mechaniczny”, 2007, nr 11.
- [4] Morel J., *Drgania maszyn i diagnostyka ich stanu technicznego*, PTT, Warszawa 1997.
- [5] VDI 2056: *Normy oceny drgań mechanicznych maszyn*, 1964.
- [6] Zimroz R. Combet F., *A new method for the estimation of the instantaneous speed relative fluctuation in a vibration signal based on the short time scale transform*, ‘Mechanical Systems and Signal Processing’, 2009, Vol. 23.

- [7] Zimroz R., Haddar M., Bartelmus W., Chaari F., *Modelling of gearbox dynamics under time-varying nonstationary load for distributed fault detection and diagnosis*, 'European Journal of Mechanics', 2009, Vol. 29.

**COMPARATIVE ANALYSIS
OF VIBRATION CHARACTERISTICS
OF EXTERNAL SHAFTING
IN PROJECT 767 VESSEL**

ABSTRACT

The paper presents the results of analysis of investigations on vibrations carried out on a project 767 transport and mine-laying vessel. The investigations were conducted after the main engines had been overhauled and corrections in coaxiality of shafting were made. The analysis done makes it possible to indicate further directions for investigations and to identify symptoms unequivocally and monotonically indicating changes in coaxiality parameters or changes in technical condition of parts of shafting.

Keywords:

shafting, technical diagnostics, vibrations.