

Lech MURAWSKI  
Centrum Techniki Okrętowej w Gdańsku  
Wiesław OSTACHOWICZ  
Instytut Maszyn Przepływowych  
Polska Akademia Nauk w Gdańsku

### ANALIZA DRGAŃ WZDŁUŻNYCH LINII WALÓW

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę obliczeń sprzężonych drgań wzdlużnych linii wałów napędzanych wolnoobrotowymi silnikami okrętowymi. Opracowano program komputerowy, który wykorzystano do analizy wymienionych drgań. Zamieszczone przykłady obliczeń zostały zweryfikowane eksperymentalnie. Pomiary eksperymentalne wykazały poprawność przyjętej metody obliczeń.

### ANALYSIS OF AXIAL VIBRATION OF MARINE MAIN ENGINE CRANKSHAFT

Summary. The method of the computer calculations of coupled axial vibration of marine slow speed main engine shafting is presented. Computer program for calculations of coupled axial vibrations have been worked out. The computer results of considered model were thoroughly investigated and some comparisons with experimental test are enclosed.

### АНАЛИЗ ОСЬЕВЫХ ВИБРАЦИЙ СУДОВЫХ ВАЛОВ

Резюме. Эта работа помещает метод нумерических вычислений сопряжённых вибраций осьевых коленчатых валов вольнообращательных судовых двигателей. Авторы разработали специализированную программу вычислений продольных сопряжённых вибраций. Помещенные примеры вычислений остались проверены измерениями, которые обнаружили правильность принятого метода вычислений.

## 1. WSTĘP

Praca zawiera zmodernizowaną metodę obliczeń drgań wzdłużnych linii wałów napędzanych silnikami wolnoobrotowymi. Opracowano program komputerowy oparty na metodzie elementów skończonych, który służy do obliczeń amplitud drgań wymuszonych oraz reakcji występujących w łożysku oporowym i w tłumiku drgań wzdłużnych. Obliczenia drgań wzdłużnych linii wałów statków mają na celu określenie poziomu amplitud i porównanie ich z wartościami dopuszczalnymi oraz określenie wielkości reakcji w łożyskach, które wymuszają drgania innych elementów konstrukcji okrętu.

Autorzy przedstawiają w pracy ideę metody, przykład obliczeń oraz pomiary weryfikujące obliczenia, które przeprowadzono na statku podczas rejsu próbnego.

## 2. OPIS METODY OBLICZEŃ

Opracowane programy wykorzystują standardowe procedury obliczeń drgań skrętnych linii wałów [3,4]. Programy te zaadoptowano i zaktualizowano do analizy drgań linii wałów napędzanych współczesnymi silnikami okrętowymi. Wprowadzono nowe metody wyznaczania macierzy równań ruchu dla wody towarzyszącej śrubie napędowej, sprzęgieł elastycznych i tłumików drgań. Zaktualizowano i rozszerzono (o wyznaczanie sił promieniowych) procedury wyznaczania wymuszeń od sil gazowych i masowych silnika. Poprzez siły masowe rozumiemy siły bezwładności od mas układu łokowo - korbowego wykonujących ruch obrotowy oraz od mas wykonujących ruch posuwisto - zwrotny. Siły gazowe są wywoływane poprzez ciśnienie czynnika roboczego wywierane na tłok. Procedury umożliwiające przeprowadzenie obliczeń sprzężonych drgań linii wałów stanowią oryginalny dorobek autorów.

Omawiana procedura oparta jest na metodzie nieodkształcalnych elementów skończonych. Częstotliwości i postacie drgań własnych wyznacza się rozwiązując zagadnienie własne. Drgania wymuszone są obliczane metodą polegającą na bezpośrednim całkowaniu równań ruchu.

Autorzy przewidzieli możliwość obliczeń drgań wzdłużnych linii wałów pod wpływem sił wymuszających, pochodzących z następujących źródeł:

- a – odkształcenia wału korbowego pod wpływem gazowych i masowych sił promieniowych;
- b – odkształcenia wału korbowego na skutek drgań skrętnych linii wałów;
- c – zmiennych, wzdłużnych sił hydrodynamicznych indukowanych na śrubie napędowej;
- d- sprzężenia drgań skrętnych z drganiami wzdłużnymi poprzez śrubę napędową.

W modelu obliczeniowym przewidziano możliwość uwzględnienia wszystkich podstawowych elementów układu napędowego: wału korbowego, wałów pośrednich, śruby napędowej, tłumików drgań skrętnych i wzdłużnych, sprzęgieł elastycznych oraz prądnicy wałowej. Specyfiką okrętowych układów napędowych jest konieczność uwzględniania wpływu "wody towarzyszącej" dla śruby napędowej. Autorzy proponują przyjmować masy, masowe momenty bezwładności oraz tłumienia wody towarzyszącej śrubie na podstawie empirycznych formuł opracowanych przez H. Schwanecke [2]. Charakterystyki bez-

władnościowe, sztywnościowe oraz tłumiące sprzęgieł elastycznych i tłumików należy przyjmować na podstawie danych producentów.

W omawianej procedurze sprzężone wymuszenia drgań wzdłużnych wyznacza się obliczając poszczególne składowe harmoniczne masowych i gazowych sił skrętnych. Amplitudy drgań skrętnych poszczególnych wykorbień i śruby napędowej oraz siły promieniowe są transponowane do wzdłużnych sił wymuszających. W celu określenia stopnia sprzężenia sił promieniowych i amplitud drgań skrętnych z wymuszeniami osiowymi autorzy zdefiniowali następujące wielkości:

- współczynnik sprzęgający siły promieniowe z siłami osiowymi:

$$k_r = \frac{F_r}{F_l},$$

gdzie:

- $F_r$  - siła promieniowa,
- $F_l$  - siła wzdłużna.

- współczynnik sprzęgający amplitudy drgań skrętnych z siłami osiowymi:

$$k_t = \frac{\Delta\phi}{F_l},$$

gdzie:

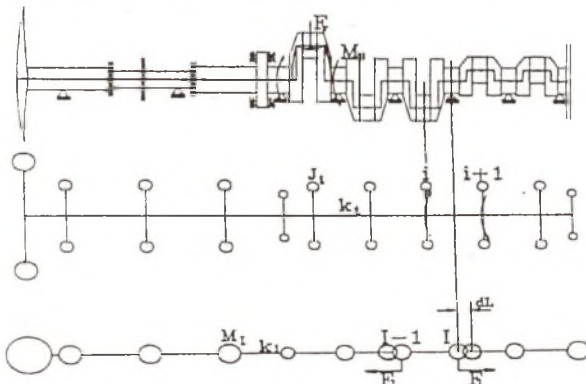
- $\Delta\phi$  - względne odkształcenie skrętne odcinka wału.

Sposoby wyznaczania współczynników sprzęgających (obliczenia weryfikowane pomiarami) podano w odrębnych pracach [5,6]. Przybierają one zróżnicowane wartości dla poszczególnych wykorbień jednego wału korbowego. Obliczone przez autorów typowe wielkości współczynników sprzęgających potwierdzone badaniami eksperymentalnymi przybierają następujące wartości:

$$k_r = 2.5 \div 5.0,$$

$$k_t = 1.0 \times 10^{-7} \div 6.0 \times 10^{-7} [\text{rad}/N].$$

Model fizyczny typowego układu napędowego oraz sposoby jego dyskretyzacji do obliczeń drgań skrętnych oraz wzdłużnych przedstawiono na rys.1.



Rys. 1. Fizyczny i dyskretny model linii wałów do obliczeń drgań wzdłużnych i skrętnych

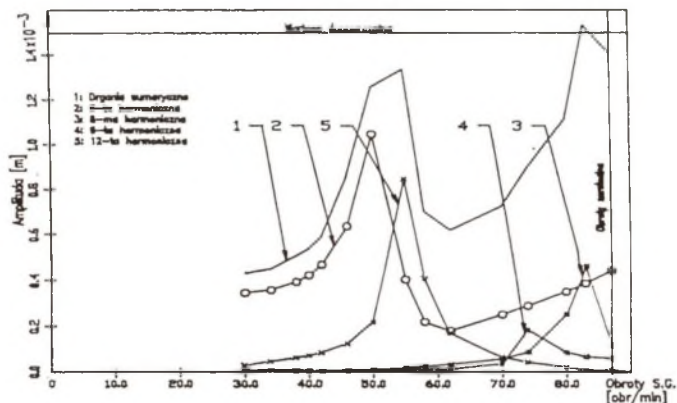
Fig. 1. Physical and discrete model of shaftline for axial and torsional vibration

### 3. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Obliczenia oraz pomiary weryfikacyjne zostały przeprowadzone dla masowca o nośności 163000ton, długości 283m i szerokości 45m. Na jego układ napędowy składa się silnik typu Sulzer 6 RTA-76 o mocy 13330kW, napędzający pięcioskrzydłową śrubę o średnicy 7.8m.

Podczas obliczeń uwzględniono sprzężenia z siłami promieniowymi oraz sprzężenia z drganiami skrętnymi wału korbowego i śruby napędowej. Nie uwzględniono wzdłużnych sił hydrodynamicznych, ponieważ obliczenia wstępne wykazały ich znikomy wpływ na poziom amplitud drgań wzdłużnych. Analizie poddano dwanaście pierwszych składowych harmonicznnych.

Na rys.2 przedstawiono wyniki obliczeń amplitud drgań wolnego końca wału korbowego. Obliczeniowa częstotliwość drgań własnych (pierwsza forma) wynosi  $f_1 = 11.07 Hz$ . Wielkość szóstej składowej harmonicznej reakcji w łożysku oporowym, wynosi 267kN (dla obrotów nominalnych -87rpm).



Rys. 2. Amplitudy drgań wolnego końca wału korbowego - obl.

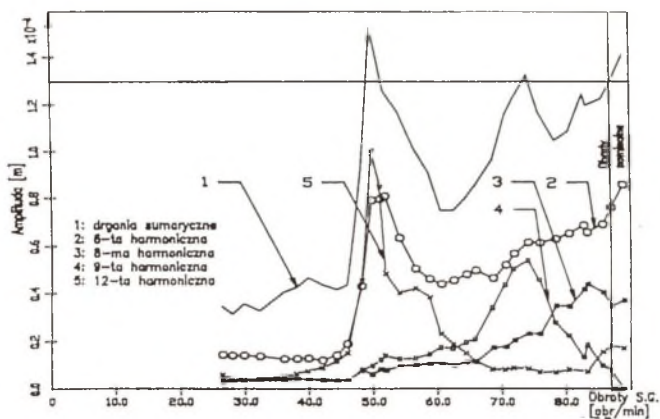
Fig. 2. Amplitudes of free end crankshaft vibration - calculate

Analiza obliczeń sprzężonych drgań wzdłużnych linii wałów wykazała, że istnieje zagrożenie wystąpienia niebezpiecznych dla pracy silnika głównego drgań wału korbowego. Wysoki poziom wymuszeń innych elementów konstrukcji statku przez drgania wzdłużne wymaga dalszej analizy obliczeniowej i pomiarów sprawdzających.

### 4. WERYFIKACJA POMIAROWA

Pomiary zostały przeprowadzone przez zespół pomiarowy Ośrodka Mechaniki Konstrukcji Okrętu przy Centrum Techniki Okrętowej, w skład którego wchodził jeden z autorów pracy.

Pomiary drgań wzdlużnych przeprowadzono za pomocą stykowych czujników przemieszczeń opracowanych w Instytucie Lotnictwa. Rejestrację przeprowadzono siedmio-kanalowym rejestratorem magnetycznym firmy Racal USA. Analizę wykonano przy pomocy mikrokomputera IBM PC, wyposażonego w procedury FFT. Pomiary drgań wzdlużnych linii wałów przeprowadzono na swobodnym końcu wału korbowego silnika głównego (rys.3).



Rys. 3. Amplitudy drgań wolnego końca wału korbowego - pom.

Fig. 3. Amplitudes of free end crankshaft vibration - measure

Weryfikacja wykazała zadowalającą zgodność obliczeń z pomiarami. Pomiary potwierdziły istnienie stosunkowo wysokich, niebezpiecznych dla pracy silnika poziomów amplitud drgań. Wielkość sił wymuszających jest wysoka, co wywołuje istotne drgania konstrukcji kadłuba statku.

## 5. WNIOSKI

Sprzężenia kinematyczne wału korbowego mają wpływ głównie na poziom drgań wzdlużnych wału w rejonie łożyska oporowego. Jeżeli celem analizy jest określenie stopnia bezpieczeństwa pracy silnika, należy szczegółowo rozpatrzyć amplitudy drgań swobodnego końca wału korbowego. W przypadku, gdy celem pracy jest określenie wpływu drgań osiowych na inne elementy konstrukcyjne statku, należy poddać szczegółowej analizie poziom drgań łożyska oporowego.

Przedstawiona procedura pozwala na dość dokładne określenie poziomów drgań wzdlużnych linii wałów. Na tej podstawie można przewidzieć stopień bezpieczeństwa pracy silnika oraz wpływ drgań wzdlużnych na inne konstrukcje okrętowe.

## LITERATURA

- [1] Akazawa M., Honda M.: Torsional vibration in geared diesel system. *Japan Shipb. & Mar. Eng.*, no.11, 1968.
- [2] Dien R., Schwanecke H.: Die propellerbedingte wechselwirkung zwischen schiff und maschine - teil 2. *Motortechnische*, vol.34, no.11, 1973.
- [3] Kruszewski J., Gawroński W., Ostachowicz W., Tarnowski J., Wittbrodt E.: *Metoda elementów skończonych w dynamice konstrukcji*. Arkady, Warszawa 1984.
- [4] Kruszewski J., Gawroński W., Wittbrodt E., Najbar F., Grabowski S.: *Metoda sztywnych elementów skończonych*. Arkady, Warszawa 1975.
- [5] Murawski L.: *Drgania wzdłużne wałów korbowych wolnoobrotowych silników okrętowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Mechanika, z.113, Gliwice 1993.
- [6] Murawski L.: *Metodyka obliczeń drgań osiowych wałów korbowych wolnoobrotowych silników okrętowych*. Zeszyty Problemowe Centrum Techniki Okrętowej, nr B - 051, Gdańsk 1992.
- [7] *Vibration control in ships*. DNV, Oslo 1985.

Recenzent: Dr hab. inż Jerzy Świder

Wpłynęło do Redakcji w grudniu 1993 r.

**Abstract**

The purpose of the present paper is to study coupled axial vibration of marine slow speed engine shafting. Linear finite element method is used in the computer program. The standard procedures of torsional and axial vibration calculation are contained in the present program. The following axial excitations are taken into account in calculations:

- coupled with radial forces,
- coupled with torque,
- coupled with propeller torsional vibration,
- hydrodynamics axial forces.

Reaction forces and amplitudes of axial vibration are given out by the program. Test results of complete calculations of axial vibrations are given in the paper (fig.2). The results of test calculations are well compatible with revision measurement (fig.3).