

Lech MURAWSKI
Centrum Techniki Okrętowej, Gdańsk

ANALIZA PORÓWNAWCZA METOD WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKÓW SPRZĘGAJĄCYCH DRGANIA SKRĘTNO-GIĘTNO-WZDŁUŻNE WAŁÓW KORBOWYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę metod wyznaczania współczynników sprzęgających drgania skrętno-giętno-wzdłużnych wałów korbowych połączonych z okrętowymi liniami wałów. Dwie metody obliczeń polegają na analitycznym wyznaczaniu deformacji wałów korbowych metodą elementów skończonych. Metoda eksperymentalna polega na pośrednim wyznaczeniu współczynników sprzęgających na podstawie analizy pomiarów drgań wzdłużnych. Dokonano również analizy wpływu sztywności podparcia wału w łożyskach głównych. Analizę przeprowadzono dla wałów korbowych silników Sulzer typu 6 RTA-76, 6 RT-72 i 6 RT-62.

COUPLING COEFFICIENTS OF A TORSIONAL-BENDING-LONGITUDINAL CRANKSHAFT'S VIBRATION. COMPARATIVE ANALYSIS OF CALCULATIONS METHODS

Summary. Analysis methods of a coefficient which couples torsional-bending-longitudinal marine crankshaft's vibration are presented. There are two analytical methods of the crankshaft's deformation, based on the finite element method. Coupling's coefficients are determined by measurements of the shaft line's longitudinal vibration, in the experimental method. A deflexion in the main bearings of the crankshafts is taken in the paper into account. Analysis of the Sulzer's engine type 6 RTA-76, 6 RT-72 and 6 RT-62 is presented.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ НАЗНАЧЕНИЯ СОПРЯЖЕННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ КРУТИЛЬНО- ИЗГИБНО-ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИИ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ

Резюме. Эта статья помещает анализ методов назначения коэффициентов продольных колебаний коленчатых валов сопряженных с крутильно-изгибными вибрациями. Анализ проведен вместе с нагонятым судовым валом. Автор разработал два аналитические способа деформирования коленчатых валов. Вычисления переведено методом конечных элементов. Третий способ является экспериментальным методом. Через анализ продольных вибрации вычислено сопряженные коэффициенты. Автор подчинил анализу жесткости подкреплению коленчатого вала. Анализ катает коленчатых валов двигателя Sulzer 6 RTA-76, 6 RT-72 и RT-62.

1. WSTĘP

Znajomość współczynników sprzęgających drgania skrętno-giętno-wzdłużne jest niezbędna do przeprowadzenia analiz drgań wzdłużnych układu mechanicznego: linia wałów napędowych - wał korbowy silnika okrętowego [3]. W pracy przedstawiono porównanie trzech metod wyznaczania tych współczynników. Dwie analityczne [6] bazują na programach metody elementów skończonych: OK-MES i ADINA. Obliczenia przeprowadzono na komputerach typu IBM 386 i 486. Trzecia metoda jest oparta na badaniach eksperymentalnych [3, 5], przeprowadzonych na obiekcie rzeczywistym.

Obliczenia przeprowadzono dla wałów korbowych silników firmy Sulzer typu 6 RTA-76, 6 RT-72 oraz 6 RT-62. Są to wały silników sześciocylindrowych. Cyfra na końcu symbolu silnika oznacza średnicę cylindra podawaną w centymetrach. Średnice czopów głównych i korbowych tych wałów wynoszą odpowiednio: 0,790 m, 0,780 m i 0,670 m, natomiast długości całego wału korbowego wynoszą odpowiednio: 11,090 m, 10,080 m i 8,660 m. Wały korbowe silników 6 RTA-76 i 6 RT-72 są zbliżone do siebie wymiarowo, natomiast wały silników 6 RT-72 i 6 RT-62 są podobne geometrycznie.

2. METODY ANALIZ

Względne odkształcenie skrętne wykorbienia wału korbowego powoduje jego wzdłużną deformację. Podobnie siły promieniowe odkształcają poosiowo wał korbowy [2]. Celem obliczeń jest określenie stosunku siły promieniowej (względnej amplitudy skrócenia) do siły wzdłużnej przy założeniu, że deformacja poosiowa wału pod wpływem obu obciążeń jest taka sama. Pozwoli to na wyznaczenie ekwiwalentnych sił wzdłużnych (przy znajomości sił promieniowych lub amplitud skrócenia wału) czyli wymuszeń drgań wzdłużnych linii wałów.

Autor zdefiniował współczynnik k_r , sprzęgający siły promieniowe (F_r) z siłami wzdłużnymi (F_t) w następujący sposób:

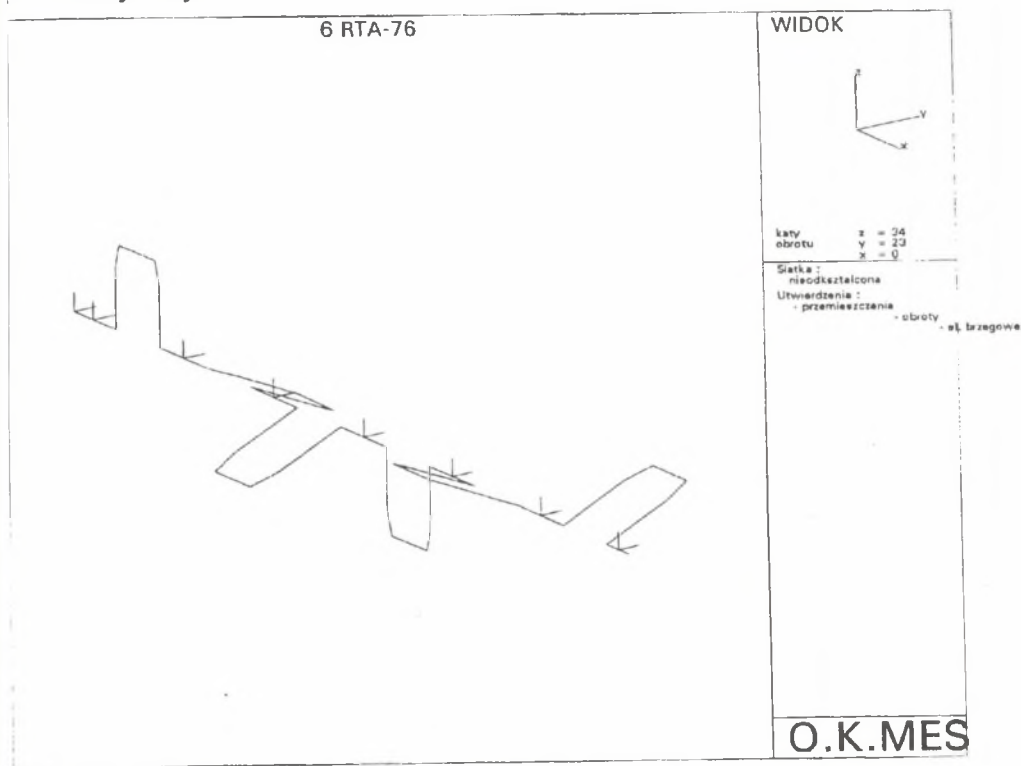
$$k_r = \frac{F_r}{F_t} \quad (1)$$

Współczynnik k_t , sprzęgający odkształcenie skrętne wału korbowego ($\Delta\Phi$) z siłami wzdłużnymi (F_t) został zdefiniowany podobnie:

$$k_t = \frac{F_t}{\Delta\Phi} \quad (2)$$

Rozpatrzono dwie analityczne metody wyznaczania odkształceń wałów korbowych. W pierwszej zastosowano program OK-MES, natomiast w drugiej program ADINA. W pierwszej metodzie [1] zamodelowano $\frac{1}{4}$ pojedynczej korby wału korbowego 16-węzłowymi,

krzywoliniowymi, izoparametrycznymi elementami skończonymi (wykorzystano 23 elementy). Następnie zamodelowano cały wał korbowy elementami belkowymi (o sześciu stopniach swobody na węzeł), dobierając charakterystyki geometryczne belek na podstawie analizy odkształceń korby zamodelowanej elementami 16-węzłowymi. Belkowy model wału korbowego ma 241 stopni swobody. Druga metoda obliczeń polega na zamodelowaniu całego wału korbowego 21-węzłowymi elementami trójwymiarowymi. Drugi model wału zawiera 21612 stopni swobody. Model belkowy wału korbowego silnika 6 RTA-76 został przedstawiony na rys. 1.

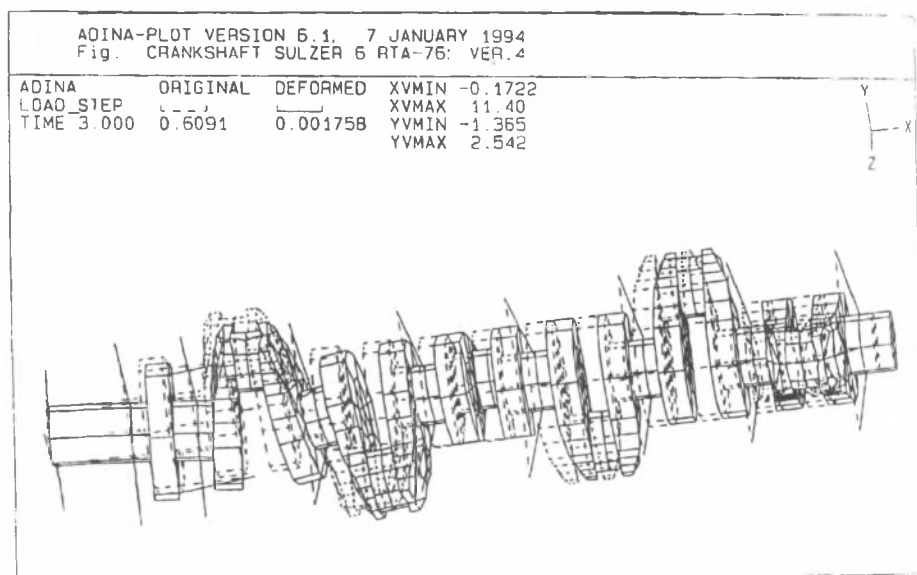


Rys. 1. Wał korbowy silnika 6 RTA-76 zamodelowany elementami belkowymi
Fig. 1. Crankshaft (6 RTA-76 engine) modelled by beam elements

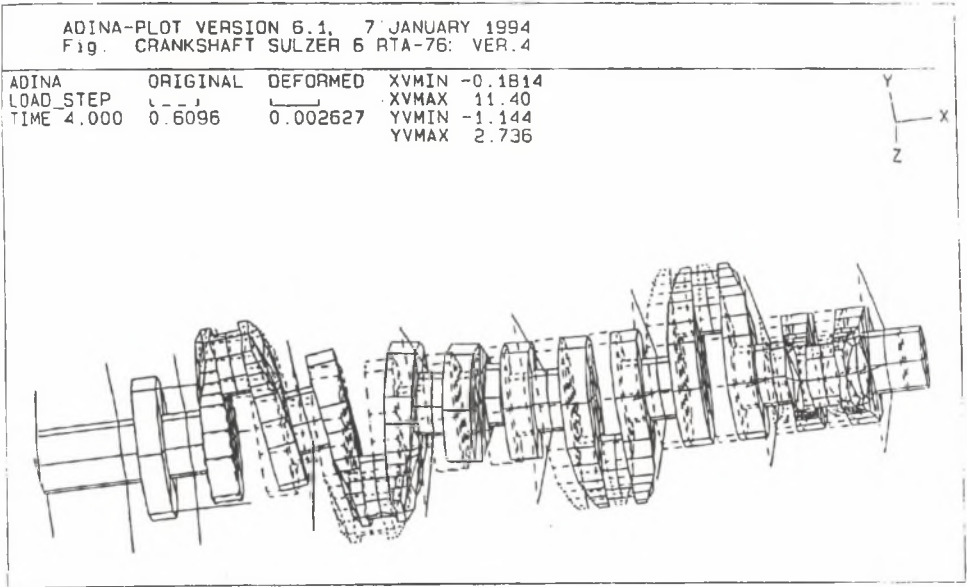
Eksperymentalna metoda wyznaczania współczynników k_r i k_k polega na przeprowadzeniu pomiarów drgań wzdłużnych układu mechanicznego: linia wałów napędowych - wał korbowy silnika okrętowego. Pomiarów dokonano na obu końcach wału korbowego. Następnie autor przeprowadził analizy harmoniczne drgań tak dobierając współczynniki sprzęgające, aby obliczenia drgań wzdłużnych były zgodne z pomiarami. Pomiary przeprowadzono w trakcie rejsu próbnego tankowca o nośności 90000 ton i długości 247.2 m. Statek ten jest wyposażony w silnik 6 RTA-76 o mocy 9925 kW (przy 80 obr./min) napędzający pięcioskrzydłową śrubę o średnicy 7.3 m.

3. WYNIKI BADAŃ

Na rysunku 2 i 3 przedstawiono przykładowy obraz deformacji wału korbowego silnika Sulzer 6 RTA-76. Odształcenie nastąpiło pod wpływem sił promieniowych działających kolejno na pierwsze i drugie wykorbienie. Przedstawiony model wału korbowego został wykorzystany w obliczeniach programem ADINA. W wersji obliczeń zaprezentowanych na rysunkach ugięcie wału w łożyskach głównych wynosi 0.65 mm. Podobnie wyglądają obrazy odształceń przy innych wartościach ugięcia wału oraz dla pozostałych typów silników.



Rys. 2. Deformacja wału korbowego pod wpływem sił promieniowych 1. cylindra
Fig. 2. First cylinder radial forces are deforming crankshaft



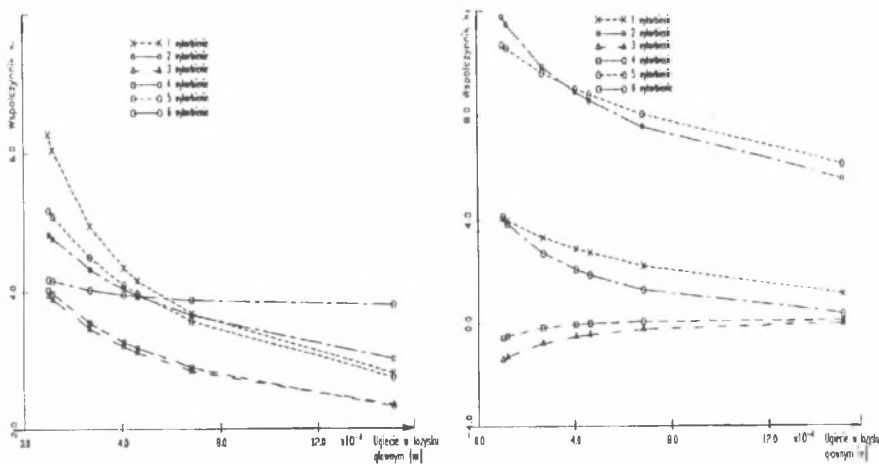
Rys. 3. Deformacja wału korbowego pod wpływem sił promieniowych 2. cylindra
 Fig. 3. Second cylinder radial forces are deforming crankshaft

W tabeli 1 przedstawiono porównanie wyników obliczeń przeprowadzonych modelem belkowym (OK-MES) z obliczeniami dla modelu trójwymiarowego (ADINA) oraz z wynikami uzyskanymi z pomiarów. Porównanie przeprowadzono dla wału korbowego silnika Sulzer typu 6 RTA-76.

Tabela 1
Porównanie uzyskanych wartości współczynników k_r i k_t

Numer cylindra		model belkowy	model 3-D	pomiary
		k_r	k_r	k_r
Cyl.	1	3.216	3.665	3.63
Cyl.	2	5.451	3.642	3.51
Cyl.	3	5.806	2.845	2.83
Cyl.	4	4.863	2.891	2.83
Cyl.	5	5.917	3.558	3.49
Cyl.	6	5.897	3.869	3.32

Wpływ wielkości ugięcia wału korbowego w łożyskach głównych, na wielkość współczynników k_r i k_t dla poszczególnych wykorbień przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Współczynnik k_r i k_t w zależności od ugięcia wału w łożyskach głównych
Fig. 4. Relationship between deflection in the main bearing and coefficient k_r , k_t

W tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń przeprowadzonych dla wałów korbowych silników sześciocyndrowych, różnych wielkości oraz różnych typów. Wartości współczynnika k_t podano w jednostkach: $\times 10^6 \frac{\text{deg}}{\text{m}}$. Wielkość ugięcia wału w łożyskach głównych silnika 6 RTA-76 wynosi 0.65 mm, natomiast dla silników 6 RT-72 i 6 RT-62 wynosi 0.55 mm [4]. Podane wartości ugięcia wału występują przy maksymalnej sile promieniowej oraz na łożyskach wykorbienia, na które działa siła.

Tabela 2
Wartości współczynników k_r i k_t dla różnych typów silników

Numery cylindra		6 RTA-76		6 RT-72		6 RT-62	
		k_r	k_t	k_r	k_t	k_r	k_t
Cyl.	1	3.665	2.202	4.806	2.474	5.042	2.328
Cyl.	2	3.642	7.537	4.594	8.691	4.678	7.864
	3	2.845	-0.262	3.716	0.573	3.712	-0.197
Cyl.	4	2.891	0.041	3.012	0.084	3.771	0.077
Cyl.	5	3.558	8.001	4.236	9.733	4.549	8.587
Cyl.	6	3.869	1.289	4.871	1.497	4.916	1.392

4. WNIOSKI

Zbieżność wyników metody analitycznej wykorzystującej program ADINA z wynikami otrzymanymi na podstawie badań eksperymentalnych pozwala sądzić, że współczynniki k_r i k_t są wyznaczone prawidłowo. Obie metody nadają się do analizy odkształceń wału korbowego. Metoda eksperymentalna jest możliwa do przeprowadzenia po zakończeniu budowy statku. Jej wartość ogranicza się do weryfikacji obliczeń analitycznych lub do wstępnej oceny jednostek wyposażonych w silniki podobne [5]. Przydatność uproszczonego, belkowego modelu jest wątpliwa w analizie odkształceń i naprężeń wałów korbowych [1].

Istotny wpływ na wielkości współczynników sprzęgających ma ugięcie wału korbowego w łożyskach głównych. Wyniki obliczeń przeprowadzonych dla różnych typów silników sześciocyndrowych dają zbliżone do siebie wartości współczynników k_t . Wartości tych współczynników zmieniają się w przypadku silników o innej liczbie cylindrów. Typ silnika istotnie wpływa na wartość współczynnika k_r , niż jego wielkość.

Poprawny obraz drgań wzdłużnych linii wałów [3] można uzyskać przeprowadzając obliczenia dokładnym trójwymiarowym modelem wału korbowego z uwzględnieniem dynamiki łożysk głównych [4].

LITERATURA

- [1] Drążkowiak B.: Ocena przydatności prętowego modelu wału korbowego w analizie wytrzymałości, metodą elementów skończonych. Praca doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 1993
- [2] Jenzer J., Welte Y.: Coupling effect between torsional and axial vibrations in installations with two-stroke diesel engines. NSD, May 1991
- [3] Murawski L., Ostachowicz W.: Analiza drgań wzdłużnych linii wałów. Z. N. Politechniki Śląskiej, s. Mechanika z. 115, Gliwice 1994, s. 265 ÷ 270
- [4] Murawski L.: Numeryczna analiza stanów dynamicznych łożysk głównych wałów korbowych okrętowych silników wolnoobrotowych. Zeszyty Problemowe Centrum Techniki Okrętowej, nr 059, Gdańsk 1993
- [5] Tsuda K., Teon H.: Theoretical analysis of coupled torsional - axial undamped vibration of marine shafting. Japan Shipb. & Marine Eng., vol.4, no.5., 1969
- [6] Visser N. J.: The axial stiffness of marine diesel engine crankshaft. International Shipbuilding Progress, 1969, vol.14, no.160, pp.452466.

Recenzent: prof. dr hab. inż. W. Gutkowski

Wpłynęło do Redakcji w grudniu 1994 r.