

XIII MIĘDZYNARODOWE KOŁOKWIUM

"MODELE W PROJEKTOWANIU I KONSTRUOWANIU MASZYN"

13th INTERNATIONAL CONFERENCE ON

"MODELS IN DESIGNING AND CONSTRUCTIONS OF MACHINES"

25-28.04.1989 ZAKOPANE

Edmund WITEROBA, Jan KRUSZEWSKI, Henryk MAJEWSKI,
Stefan SAWIAK

Wydział Budowy Maszyn
Politechnika Gdańska

MODELOWANIE OKRĘTOWYCH UKŁADÓW NAPĘDOWYCH
W OBlicZENIACH DRGAŃ SKRĘTNYCH

Streszczenie. Omówiono zagadnienia związane z modelowaniem złożonych okrętowych układów napędowych przy obliczaniu drgań skrętnych. Obliczane okrętowe układy napędowe mogą zawierać: silniki spalinowe, sprzęgła elastyczne, tłumiki drgań, przekładnie, prądnice walcowe, mechanizm nastawy śruby i śrubę napędową.

1. Wprowadzenie

Problemem drgań skrętnych w okrętowym układzie napędowym jest bardzo ważny, z praktycznego punktu widzenia. Nadmierne drgania skrętne mogą spowodować wzbudzenie innych rodzajów drgań lub prowadzić do szybkiego zniszczenia elementów składowych układu napędowego. Z tego też powodu wymagania techniczne klasyfikacyjnych zobowiązują biura projektowe do przeprowadzenia obliczeń tych drgań i takiego zaprojektowania układu napędowego, aby naprężenia w wałach w całym zakresie pracy (prędkości obrotowych) układu napędowego nie przekroczyły dopuszczalnych.

Obliczenia drgań złożonego układu napędowego wymagają starannego doboru modelu obliczeniowego, aby obliczona pierwsza częstość drgań własnych układu nie różniła się od zmierzonej o więcej niż 5%.

2. Model obliczeniowy

Schemat przykładowego, rzeczywistego układu napędowego przedstawiono na rys.1. Układ składa się z:

- 1) linii wałów (prostej, rozwidlonej),
- 2) silników (rzędowych, rozwidlonych),
- 3) sprzęgieł elastycznych (o charakterystykach zależnych od częstości drgań i przenoszonego momentu, np. sprzęgło typu VULCAN),
- 4) tłumików drgań (o charakterystykach zależnych od częstości drgań),
- 5) śruby napędowej,
- 6) mechanizmu nastawy skoku śruby napędowej,
- 7) prądnic wałowych.

Układ ten wymuszany jest momentami generowanymi w poszczególnych cylindrach silników (od sił gazowych i masowych) oraz momentami generowanymi na śrubie napędowej. Wymuszenia silnikowe mogą być zakłócone awaryjną pracą, polegającą na wyłączeniu z pracy niektórych cylindrów lub nierównomiernym rozkładem średnich ciśnień indykowanych.

Działające na układ wymuszenia powodują powstanie drgań, których efektem są zmieniające się w czasie kąty skręceń wałów; naprężenia w wałach; momenty skręcające w wałach, przenoszone przez sprzęgła, koła zębate itd.

Do dyskretyzacji rzeczywistego układu napędowego zastosowano metodę sztywnych elementów skończonych [1, 2, 3]. W wyniku otrzymano model dyskretny (rys. 2) złożony ze sztywnych elementów skończonych (SES, tarcz), elementów sprężysto-tłumiących (EST, podatnych odcinków), elementów sprężystych (ES) oraz elementów tłumiących (ET).

Do sztywnych elementów skończonych redukuje się następujące fragmenty układu rzeczywistego: układy korbowe, odcinki wałów zredukowane do kołnierzy sprzęgieł sztywnych, koła zamachowe, śrubę napędową wraz z masą wody towarzyszącej, wirniki prądnic wałowych, koła przekładni zębatych, części tłumików drgań, ruchome części mechanizmu nastawczego skoku śruby napędowej oraz części sprzęgieł elastycznych i hydraulicznych.

Do elementów sprężysto-tłumiących redukuje się: odcinki wałów korbowych, odcinki wału oporowego, pośredniego i śrubowego, sprzęgła elastyczne oraz wały prądnic.

Elementami tłumiącymi są: elementy modelujące tłumienie w cylindrach układów korbowych, tłumiki drgań, elementy modelujące oddziaływanie wody na śrubę napędową, inne dodatkowe tłumiki drgań.

Wymuszenia silnikowe oraz śrubowe w dyskretnym modelu obliczeniowym traktuje się jako sumy składowych harmonicznych. Amplitudy składowych harmonicznych zależne są od numeru składowej harmonicznej i podane są w danych katalogowych, natomiast fazy zależne są od numeru składowej harmonicznej, kolejności zapłonów w cylindrach oraz faz zakłączenia silników i śruby napędowej. Wymuszenia te przyłożone są do sztywnych elementów skończonych modelujących poszczególne wykorbienia wałów korbowych oraz śrubę napędową i umieszczone są w wektorze wymusza.

W wyniku oddziaływania wymuszeń na układ masowo-sprężysto-tłumiący modelu dyskretnego wzbudzone są drgania tarcz. Amplitudy i fazy kątów skręceń tarcz otrzymuje się z rozwiązania układu równań opisującego model. Drganiom skrętnym tarcz towarzyszy pojawianie się naprężeń w elementach sprężysto-

tłumiących, sprężystych i twardych. Elementy te przenoszą odpowiednie momenty skręcające.

Elementy składowe modelu obliczeniowego scharakteryzowane są następującymi parametrami:

- 1) sztywny element skończony - I_1 masowy moment bezwładności tarczy,
- 2) element sprężysto-tłumiący - c_1 współczynnik sztywności na skręcanie, Q_1 współczynnik strat materiału, z którego wykonany jest aproksymowany odcinek wału,
- 3) element twardy - b_1 współczynnik tłumienia elementu twardego,
- 4) element sprężysty - c_1 współczynnik sztywności na skręcanie.

W trakcie wykonywania obliczeń, ze względu na różne prędkości obrotowe wałów, niezbędna jest redukcja układu. Redukcja ta wykonywana jest przez program automatycznie i użytkownik programu może o niej nawet nie wiedzieć.

Redukcja parametrów modelu dyskretnego przeprowadzana jest zgodnie z zasadą, że energia: kinetyczna, potencjalna i funkcja dysypacji układu zredukowanego (rys.2) oraz układu już zredukowanego (rys.3) są sobie równe. Stąd parametry układu zredukowanego oblicza się z następujących zależności:

- 1) masowy moment bezwładności - $I_{zr} = I \cdot i^2$
- 2) współczynnik sztywności - $c_{zr} = c \cdot i^2$
- 3) współczynnik tłumienia - $b_{zr} = b \cdot i^2$
- 4) kąt skręcenia - $\varphi_{zr} = \varphi / i$
- 5) moment skręcający - $m_{zr} = m \cdot i$

gdzie $i = n_1/n_2$ - przekształcenie będące stosunkiem prędkości obrotowej wału w układzie zredukowanym do prędkości obrotowej wału, do którego zredukowany jest układ napędowy (prędkości zredukowanej). Zakłada się, że w uruchomionym programie układ będzie zredukowany do wału silnika pierwszego.

3. Równania ruchu

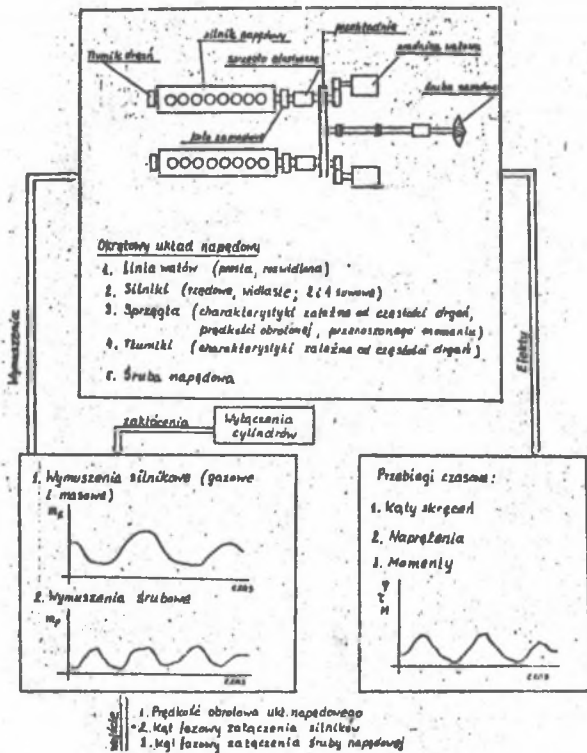
Równania ruchu układu zredukowanego modelu obliczeniowego mają postać [3]:

$$A(n, \omega) \cdot \ddot{q}(t) + B(n, \omega) \cdot \dot{q}(t) + C(n, \omega) \cdot q(t) = p(n, \omega, t), \quad (2)$$

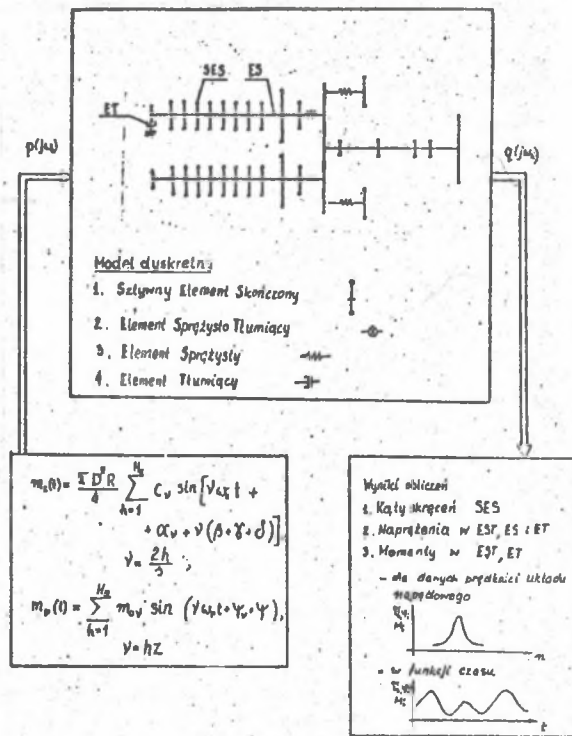
gdzie: A - diagonalna macierz bezwładności,
 B - macierz tłumienia,
 C - macierz sztywności,
 n - prędkość obrotowa układu napędowego,
 ω - częstość drgań układu.

Macierz bezwładności układu zredukowanego jest macierzą diagonalną. Jej wyrazy diagonalne są równe masowym momentom bezwładności poszczególnych sztywnych elementów skończonych zredukowanych do wału silnika pierwszego, wg zależności (1). Ze względu na zależność masowych momentów bezwładności niektórych elementów (np. odpowiadających tłumikom drgań) od częstości przenoszonych drgań odpowiednie wyrazy macierzy bezwładności będą w trakcie realizacji obliczeń na bieżąco korygowane.

Macierz tłumienia układu zredukowanego otrzymuje się przez tzw. agregację macierzy tłumienia B poszczególnych elementów tłumiących występujących w modelu obliczeniowym. Agreg-



Rys.1. Określony układ napędowy
Fig.1. Ship propulsion system



Rys.2. Model układu napędowego
Fig.2. Ship propulsion system model

gacja oznacza sumowanie połączone z odpowiednią lokalizacją niezerowych elementów macierzy B , w macierzy układu zredukowanego B . Wyrazy niezerowe umieszczają się w miejscach przecięć wierszy i kolumn o numerach odpowiadających numerom współrzędnych uogólnionych tarcz połączonych j -tym elementem tłumiacym.

Macierz sztywności układu zredukowanego otrzymuje się przez agregację macierzy sztywności C , poszczególnych elementów sprzężonych występujących w modelu obliczeniowym. Przebiega ona podobnie jak dla macierzy tłumienia.

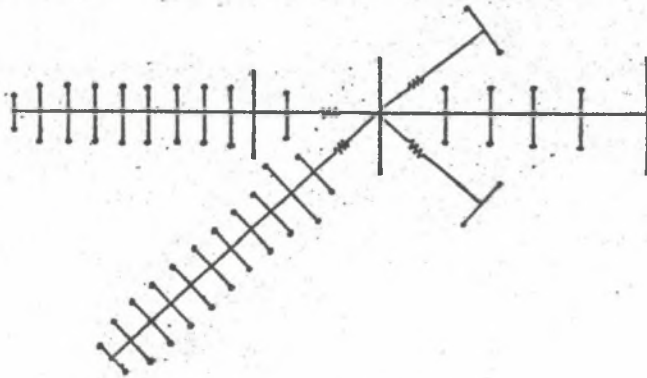
Ze względu na zależność współczynników tłumienia b , oraz sztywności c , niektórych elementów od częstości drgań i przeniesionego momentu w trakcie wykonywania obliczeń odpowiednio wyrazy macierzy będą na bieżąco korygowane.

Z rozwiązania układu równań (2) otrzymuje się zarówno parametry charakteryzujące drgania własne układu, jak i drgania wymuszone. Obliczenia wykonywane są dla różnych prędkości obrotowych układu napędowego i dla drgań składowych harmonicznych wymuszeń o różnej częstości.

4. Program obliczeń

Program komputerowy realizujący obliczenia drgań własnych i wymuszonych okrętowych układów napędowych uruchomiono na IBM XT/PC. Jest to program opracowany w wersji konwersacyjnej. Jest on wyposażony w bibliotekę katalogów typowych elementów składowych układu napędowego (silników, sprzęgieł, tłumików itp.), co znakomicie ułatwia generowanie danych obliczanego układu. Przewidziano w nim łatwą możliwość zmiany, poprawy i uzupełniania danych.

Wyniki obliczeń - którymi są częstości i postaci drgań własnych oraz kąty skręceń, naprężenia i momenty w przypadku obliczenia drgań wymuszonych - wyprowadzane są w takiej formie, że można je bezpośrednio dołączyć do dokumentacji projektowej statku. Przewidziano ich 2 postaci: tabelaryczną i graficzną.



Rys.3. Układ zredukowany
Fig.3. Reduced system

LITERATURA

- [1] J. KRUSZEWSKI, W. GAWRONSKI, E. WITTBRODT, F. NAJBAR, S. GRABOWSKI: Metoda sztywnych elementów skończonych. Arkady, W-wa 1975.
- [2] W. GAWRONSKI, J. KRUSZEWSKI, J. TARNOWSKI, W. OSTACHOWICZ, E. WITTBRODT: Metoda elementów skończonych w dynamice konstrukcji. Arkady, W-wa 1984.
- [3] E. WITTBRODT, J. KRUSZEWSKI, H. MAJEWSKI, S. SAWIAK: Opracowanie programu obliczeń drgań skrętnych okrętowych układów napędowych. Politechnika Gdańska, Oprac. na zlec. Stoczni Gdańskiej im. Lenina, umowa nr 870348. Gdańsk 1987.

SHIP PROPULSIONAL SYSTEM MODELLING IN TORSIONAL VIBRATION ANALYSIS

S u m m a r y

Problems of complexity of propulsional system modelling in the torsional vibration analysis are described in the paper. The analysed system contains: engines, flexible couplings, dampers, gear transmission, shaft's generators, and screw propeller.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СУДОВЫХ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ
В РАСЧЕТАХ СКРУЧИВАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

Р е з ю м е

В статье излагаются проблемы, связанные с моделированием сложных судовых приводных систем при расчёте скручивающих колебаний. Расчитываемые судовые приводные системы могут содержать: двигатели внутреннего сгорания, упругие муфты, виброгасители, передачи, вавовые генераторы, установочный механизм винта и гребной винт.

Recenzent: doc. dr S. Wojciech

Wpłynęło do Redakcji 23.I.1989 r.