

УДК 621.438

А. А. ТАРАСЕНКО

*Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова,
Николаев, Украина*

ПАРАМЕТРЫ СТАЦИОНАРНЫХ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДИЗЕЛЯ С УЧЕТОМ ПЕРЕМЕННОСТИ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ОТСЕКА

Судовой пропульсивный комплекс рассматривается как крутильная система с распределенными параметрами, состоящая из маховиков (отсеков цилиндра, гребного винта), соединенных валами. Валы могут быть невесомыми (только жесткость) либо иметь распределенные параметры. Проведен сравнительный анализ результатов расчетов по определению собственных частот и форм для случаев невесомых валов соединяющих маховики и валов с распределенными параметрами. Сделан вывод о необходимости рассмотрения крутильной системы как системы с распределенными параметрами, если число рассматриваемых форм больше двух. Предложена расчетная схема и математическая модель позволяющие выполнить расчеты крутильной системы как системы с распределенными параметрами.

Ключевые слова: дизель, крутильные колебания, волновое уравнение, собственная частота, форма колебаний, демпфирование, расчетная схема.

Введение

В работе [1] рассмотрена крутильная система, состоящая, как из участков с распределенными параметрами, так и из невесомых участков без распределенных параметров. При формировании крутильной схемы с невесомыми параметрами участки валов (их моменты инерции) присоединяются к дискам.

Известны расчеты в которых крутильная схема дизеля взята с документов фирмы производителя и приведены чертежи валопровода. Также приводят выкладки, на основе которых валы валопровода заменяют дисками. Указанных данных достаточно для сравнительного анализа.

Следует отметить, что расчеты стационарных крутильных колебаний обязательны для всех классификационных обществ с обязательным торсиографированием головного судна.

Формулирование проблемы

Требуется на основе решения волнового уравнения согласно методикам, изложенным в [1], провести сравнительный анализ конкретного судна, как для схемы с невесомыми валами, так и для схемы с распределенными параметрами. Желательно сравнить полученные результаты с расчетом, взятым за базовый (например, по методике АО БМЗ).

Цель работы – обосновать необходимость учета распределенных параметров валопровода при определении форм и частот собственных колебаний и предложить соответствующую расчетную схему позволяющую это осуществить с учетом переменного момента инерции отсека.

Общие соотношения

Решение волнового уравнения для случая свободных колебаний ищем в следующем виде [1, 2]

$$\phi_j = f_j(t) \cdot Z_j(y), \quad (1)$$

где j – номер, рассматриваемой формы колебаний;

$f_j(t)$ – функция времени для формы с номером j ;

$Z_j(y)$ – функция от координаты сечения

y – форма колебаний с номером j .

Участок вала постоянного диаметра имеет podatливость

$$e_k = \frac{S_k}{G_k \cdot I_k} = \frac{S_k^2}{V_k^2 \cdot J_k}, \quad (2)$$

где S_k – длина участка с номером k ,

I_k – полярный момент инерции сечения вала,

$J_k = I_k \cdot \rho_k \cdot S_k$ – полярный момент инерции вала,

ρ_k – плотность материала вала;

$V_k = \sqrt{\frac{G_k}{\rho_k}}$ – скорость распространения малых

возмущений для участка вала с номером k .

Для вала постоянного диаметра можно записать следующее уравнение

$$z'' + z \left(\frac{\beta_{j,k}}{S_k} \right)^2 = 0, \quad (3)$$

где $\beta_{j,k} = P_j \sqrt{J_k \cdot e_k}$.

Используя выражение (2), получим

$$\beta_{j,k} = \frac{P_j}{V_k} S_k \text{ или } \frac{\beta_{j,k}}{S_k} = \frac{P_j}{V_k} \quad (4)$$

Если ввести параметр

$$\Delta Z_{j,k}(\bar{y}) = S_k \cdot Z'_{j,k}(\bar{y}), \quad (5)$$

то решение уравнения (3) примет следующий вид:

$$Z_{j,k}(\bar{y}_k) = \bar{y} \cdot \Delta Z_{j,k}(0) \cdot \frac{\sin(\beta_{j,k} \cdot \bar{y}_k)}{\beta_{j,k} \cdot \bar{y}_k} + Z_{j,k}(0) \cdot \cos(\beta_{j,k} \cdot \bar{y}_k), \quad (6)$$

$$\Delta Z_{j,k}(\bar{y}_k) = \Delta Z_{j,k}(0) \cdot \cos(\beta_{j,k} \cdot \bar{y}_k) - Z_{j,k}(0) \cdot \beta_{j,k} \cdot \sin(\beta_{j,k} \cdot \bar{y}_k). \quad (7)$$

Для случая не весомого вала $\beta_{j,k} = 0$. Тогда уравнение (7) примет вид

$$\Delta Z_{j,k}(\bar{y}_k) = \Delta Z_{j,k}(0) = \text{const},$$

где $\bar{y}_k = \frac{y_k}{S_k} = 0 \div 1$ – относительная координата внутри участка с номером k .

Это означает, что для не весомих валов значения $\Delta Z_{j,k}(\bar{y}_k)$ постоянны, а выражение (6) для случая не весомих валов примет вид

$$Z_{j,k}(\bar{y}_k) = \bar{y} \cdot \Delta Z_{j,k}(0) + Z_{j,k}(0).$$

Из записанного уравнения следует, что соединенные дискретных точек формы прямыми линиями теоретически оправдано.

Собственные частоты представляют в виде числа колебаний в минуту

$$N_j = 30 P_j / \pi.$$

Число частот может быть сколь угодно большим, но на практике $j < 7$. При расчетах по методике Терских ограничиваются двумя формами ($j < 3$).

Крутильная схема представлена в виде набора валов соединенных друг с другом. Каждый вал с номером k начинается сосредоточенной массой θ_k в тоннах на метр в квадрате (речь о полярном моменте инерции), имеет податливость e_k в нано радианах отнесенных к ньютонметру и длину S_k в метрах. Если вал не весомиый, то его длина задается отрицательной.

В таблице 1 приведены исходные данные для расчетов по крутильной схеме с сосредоточенными параметрами. В конце таблицы приведены исходные данные для расчетов по крутильной схеме с распределенными параметрами. Отличие исходных данных для схемы с распределенными параметрами в том, что часть момента инерции находится в валах.

В качестве результатов приведены значения собственных частот и форм. Для первой и второй форм значения частот и форм, полученных по различным методикам, практически совпадают. Для третьей формы результаты, полученные, для случаев сосредоточенных и распределенных параметров существенно отличаются.

Таблица 1

Сравнительный анализ результатов расчетов по методике БМЗ, случая сосредоточенных параметров (СП) и случая распределенных параметров (РП)

| k | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | винт |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|
| θ_k | 7,73 | 7,71 | 7,49 | 7,61 | 7,49 | 7,71 | 7,49 | 7,71 | 3,06 | 4,92 | 0,89 | 7,24 | 10,2 | 116 |
| e_k | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,69 | 0,49 | 3,89 | 5,83 | 1,31 | 2,24 | |
| S_k | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -3 | -4,61 | -5,2 | -11,2 | |
| Первая форма ($j = 1$) $N_{1,БМЗ} = 361,9$ об/мин; $N_{1,СП} = 360,8$ об/мин; $N_{1,РП} = 362,8$ об/мин. | | | | | | | | | | | | | | |
| БМЗ | 1 | 0,99 | 0,97 | 0,94 | 0,90 | 0,85 | 0,80 | 0,73 | 0,68 | 0,64 | 0,3 | -0,2 | -0,3 | -0,5 |
| СП | 1 | 0,99 | 0,97 | 0,94 | 0,90 | 0,85 | 0,80 | 0,73 | 0,68 | 0,64 | 0,31 | -0,2 | -0,3 | -0,5 |
| РП | 1 | 0,99 | 0,97 | 0,94 | 0,90 | 0,85 | 0,80 | 0,73 | 0,68 | 0,64 | 0,31 | -0,2 | -0,3 | -0,5 |
| Вторая форма ($j = 2$) $N_{2,БМЗ} = 1296,6$ об/мин; $N_{2,СП} = 1295,8$ об/мин; $N_{2,РП} = 1320,67$ об/мин. | | | | | | | | | | | | | | |
| БМЗ | 1 | 0,87 | 0,63 | 0,31 | -0,1 | -0,4 | -0,7 | -0,9 | -1 | -1,0 | -0,8 | -0,5 | -0,3 | 0,09 |
| СП | 1 | 0,87 | 0,63 | 0,31 | -0,1 | -0,4 | -0,7 | -0,9 | -1 | -1,0 | -0,8 | -0,5 | -0,3 | 0,09 |
| РП | 1 | 0,87 | 0,61 | 0,28 | -0,1 | -0,4 | -0,7 | -0,9 | -1 | -1,0 | -0,7 | -0,3 | -0,2 | 0,05 |
| Третья форма ($j = 3$) $N_{3,СП} = 1748,8$ об/мин; $N_{3,РП} = 2480,3$ об/мин. | | | | | | | | | | | | | | |
| СП | 1 | 0,76 | 0,35 | -0,2 | -0,6 | -0,9 | -1 | -0,9 | -0,6 | -0,4 | 1,58 | 4,30 | 3,55 | -0,5 |
| РП | 1 | 0,53 | -0,2 | -0,8 | -1,1 | -0,8 | -0,2 | 0,54 | 0,90 | 1,06 | 0,98 | 0,69 | 0,53 | -0,1 |
| Исходные данные для случая распределенных параметров (РП) | | | | | | | | | | | | | | |
| θ_k | 7,73 | 7,71 | 7,49 | 7,61 | 7,49 | 7,71 | 7,49 | 7,71 | 3,06 | 4,92 | 0,28 | 0,37 | 0,65 | 113 |
| e_k | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,69 | 0,49 | 3,89 | 5,83 | 1,31 | 2,24 | |
| S_k | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -3 | 4,61 | 5,2 | 11,2 | |

Полученные значения форм можно иллюстрировать рисунком рис. 1 и рис. 2.

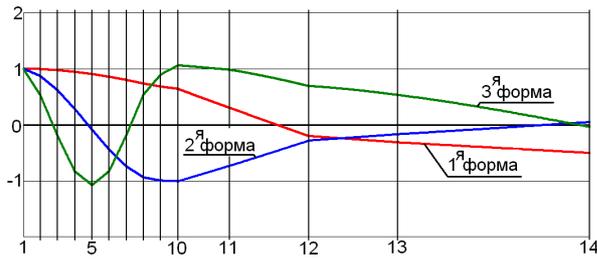


Рис. 1. Формы для случая распределенных параметров

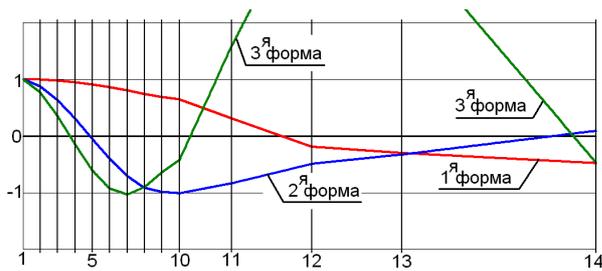


Рис. 2. Формы для случая сосредоточенных параметров

Следует отметить, что для первой и второй форм результат на рис.2. практически такой же как при применении методик Терских или АО БМЗ. Эти методики характерны тем, что базируются на сосредоточенных параметрах (невесомые валы и диски в начале вала).

Реальная судовая крутильная система имеет в своем составе длинные и тяжелые (весомые) валы, которые имеют распределенные параметры. На рис.1.приведены формы для системы с распределенными параметрами.

Сравнение графиков рис. 1 и рис. 2 показывает, что для первой и второй форм учет распределенных параметров не обязателен. Однако для старших форм учет распределенных параметров необходим. Алгоритм, по которому вычислялись все формы один и тот же. И нет оснований полагать, что вычисление третьей формы имеет особенности.

Результатами, полученными для системы с сосредоточенными параметрами, можно считать достоверными, потому, что они практически совпадают с результатами известных расчетов.

Выбор расчетной схемы

Выбор расчетной схемы усложняется тем, что моменты инерции отсеков дизеля переменны. В качестве примера рассмотрим дизель производства Брянского завода 8ДКРН 60/195. Это лицензионная копия дизеля L60МС. Изменение момента инерции этого дизеля показано на рис. 4.

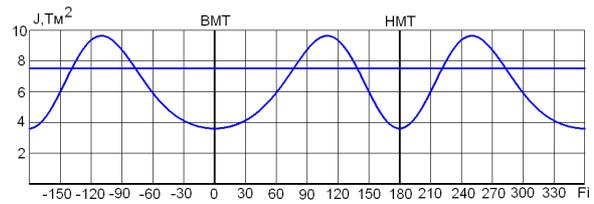


Рис. 3. Зависимость приведенного момента инерции отсека дизеля от угла поворота кривошипа

На рис. 3 горизонтальная линия – это значение момента инерции, рекомендованное фирмой для крутильной схемы (7,5 тм²). Из рисунка видно, что момент инерции отсека изменяется более чем в два раза. Уравнение движения отсека переменного момента инерции [2]

$$\ddot{\theta}_k \cdot (\theta_k + J_{k\text{ пр}}) = \Sigma M_k - \frac{\omega_k^2}{2} \frac{d}{d\phi} (J_{k\text{ пр}}),$$

где $J_{k\text{ пр}}$ - переменная часть момента инерции,

θ_k - постоянная часть момента инерции отсека,

M_k - крутящий момент, приложенный к отсеку.

Из приведенного уравнения видно, что изменение момента инерции отсека влияет на все приложенные к отсеку крутящие моменты.

На рис 4 приведена составная расчетная схема.

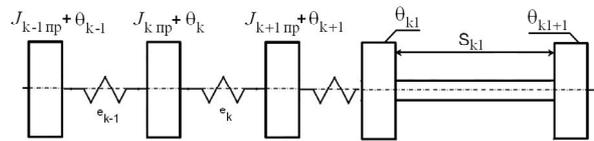


Рис. 4. Составная расчетная схема

Можно вычислить формы и частоты в зависимости от угла поворота валопровода (рис. 5).

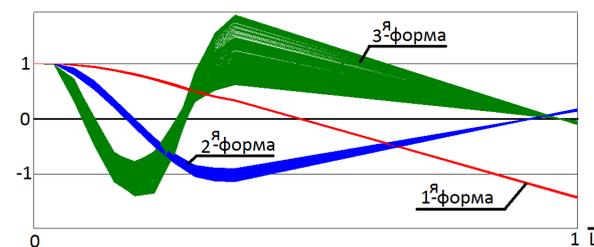


Рис. 5. Формы в зависимости от угла поворота

На рисунке 5 формы наложены одна на другую с интервалом по углу поворота в градус. Видно, что первая форма практически не зависит от угла поворота. С некоторой натяжкой это можно утверждать и для второй формы.

Третья форма стабильных параметров не имеет. Это означает, что по традиционным методикам расчеты параметров третьей формы недостоверны. Поэтому их для дизелей и не считают.

Выводы

При расчетах параметров первой и второй форм моменты инерции дизеля можно считать постоянными.

Расчеты по третьей и выше форм можно не проводить так, как не стабильная собственная частота не даст резонанса.

Порядок вспышек есть смысл выбирать так, чтобы формы «расплывались» поскольку это уменьшит амплитуды колебаний.

Литература

1. Тарасенко, А. И Крутильные колебания разветвленного не симметричного пропульсивного судового дизельного комплекса [Текст] / А. И. Тарасенко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2013. – № 1. – С. 37-42.

2. Теория механизмов и машин [Текст] : учеб. пособие / К. В. Фролов, С. А. Попов, А. К. Мусатов [и др.]. – М. : Высш. шк., 1987. – 496 с.

References

1. Tarasenko, A. I Krutit'nye kolebanija razvetvlenного ne simmetrichного propul'sivного sudovого dizel'ного kompleksa [Torsional vibrations of a branched nonsymmetrical marine diesel propulsion complex]. Kharkov, Dvigateli vnutrennego sgoranija, 2013, no. 1, pp. 37-42.

2. Frolov, K. V., Popov, S. A., Musatov, A. K., Lukichev, D. M., Skvorcova, N. A., Nikonorov, V. A., Savelova, A. A., Petrov, G. N., Remizova, N. E., Akopjan, V. M. Teorija mehanizmov i mashin [Machines and mechanisms theory]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1987. 496 p.

Поступила в редакцию 18.04.2016, рассмотрена на редколлегии 15.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Н. И. Радченко, Национальный университет кораблестроения, Николаев.

ПАРАМЕТРИ СТАЦІОНАРНИХ КРУТИЛЬНИХ КОЛИВАНЬ ДИЗЕЛЯ З УРАХУВАННЯМ ЗМІННОСТІ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ ВІДСІКА

А. О. Тарасенко

Судновий пропульсивний комплекс розглядається як крутильна система з розподіленими параметрами, яка має маховики (циліндрові відсіки, гребний гвинт) поєднані валами. Вали можуть бути невагомими (тільки жорсткість) або мати розподілені параметри. Наведено порівняльний аналіз результатів розрахунків по визначенню власних частот і форм для випадків невагомих валів якими з'єднано маховики і валів з розподіленими параметрами. Зроблено висновок о необхідності розглядання крутильної системи з розподіленими, якщо число форм які розглядаються більше двох. Запропоновано розрахункову схему та математичну модель яка дозволяють робити розрахунки крутильної системи з урахуванням змінності моменту інерції.

Ключові слова: дизель, крутильні коливання, хвильове рівняння, власні частоти, форма коливань, демпфірування, розрахункова схема.

THE PARAMETERS ARE STATIONARY TORSIONAL VIBRATIONS OF DIESEL GIVEN THE VARIABILITY OF THE MOMENT OF INERTIA OF THE COMPARTMENT

A. A. Tarasenko

Ship propulsion system is considered as a torsional system with distributed parameters, consisting of flywheels (compartments cylinder propeller) connected shafts. Shafts can be weightless (only hardness) or have distributed parameters. A comparative analysis of the calculation results to determine the natural frequencies and shapes for cases weightless shafts connecting flywheels and shafts with distributed parameters. It is concluded that the torsional system has to be considered as a system with distributed parameters, if the number of pending more than two forms. Proposed two calculation schemes that allows to make a calculation of torsional system as a system with distributed parameters.

Keywords: diesel, torsional oscillations, wave equation, the natural frequency, the shape of the oscillations, damping, the calculation scheme.

Тарасенко Андрей Александрович – аспирант кафедры теоретической механики Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: tai777@ukrpost.net.

Tarasenko Andrei Aleksandrovich – postgraduate of Dept. of Theoretical Mechanics, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine, e-mail: tai777@ukrpost.net.