

УДК 621.438

А. И. ТАРАСЕНКО, А. А. ТАРАСЕНКО

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

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ КРУТИЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ДИЗЕЛЯ С УЧЕТОМ ПЕРЕМЕННОСТИ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ОТСЕКА

Рассматривается судовой пропульсивный комплекс, состоящий из малооборотного дизеля (МОД), винта регулируемого шага (ВРШ) и валопровода в котором смонтирован механизм изменения шага (МИШ). Для создания модели рассмотрен турбонаддувочный агрегат с ресиверами компрессора и турбины. При рассмотрении дизеля была учтена модель регулятора скорости. При рассмотрении пропульсивного комплекса учтена модель системы дистанционного автоматического управления (ДАУ) дизеля. При анализе крутильных колебаний в валопроводе учтен переменный момент инерции отсеков дизеля и производная от него.

Ключевые слова: дизель, турбонаддувочный агрегат, винт регулируемого шага (ВРШ), регулятор скорости, система дистанционного автоматического управления (ДАУ), крутильные колебания.

Введение

Настоящая статья посвящена переходным процессам в системе малооборотный дизель (МОД) – винт регулируемого шага (ВРШ) при маневрах и быстрых проходах запретных зон.

В работах [1, 2] автором рассмотрен комплекс вопросов касающихся системы (МОД) - (ВРШ) в условиях маневров и динамических воздействий. Более того, результаты этих работ были использованы при реальном проектировании судов ледового плавания. Разработанные автором в настоящее время универсальные широкодиапазонные модели доведены до работающих программ. Доклад части материала на 1st torsional vibration symposium в Зальцбурге вызвал интерес и авторы решили предпринять очередное уточнение расчетной схемы. Это уточнение заключается в учете переменности момента инерции отсека дизеля.

1. Формулирование проблемы

Требуется получить систему обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих параметры системы дизель–валопровод–гребной винт в условиях маневра или быстрого прохода запретных зон. При формировании модели судового пропульсивного комплекса необходимо использовать дифференциальные уравнения, описывающие турбонаддувочный агрегат и его пневматические емкости [4]. Разрабатываемая математическая модель должна включать в себя модель регулятора скорости дизеля и модель системы дистанционного автоматического

управления (ДАУ). Полученная система обыкновенных дифференциальных уравнений должна решаться численным методом на ЭВМ.

Цель работы – разработка математической модели судового пропульсивного комплекса в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений, реализация этой модели на ЭВМ путем численного решения дифференциальных уравнений и сравнительные расчеты на ЭВМ.

1.1. Общие соотношения

Схема судового пропульсивного комплекса судна показана на рис. 1.

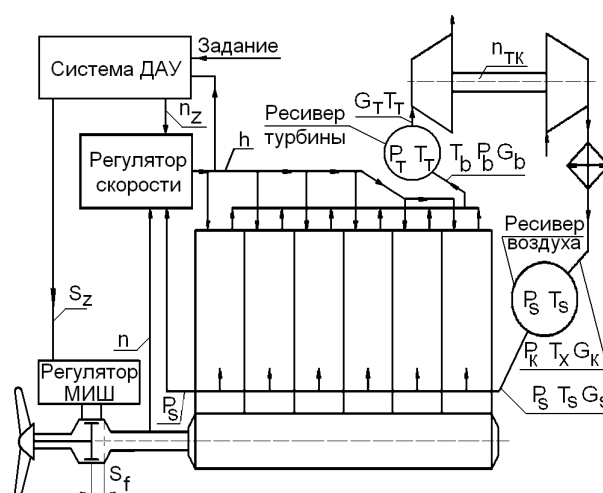


Рис.1. Схема пропульсивного комплекса судна

На рис. 1 показана схема пропульсивного комплекса и схема связей между отдельными агрегатами

ми. На рис. 1 приняты следующие обозначения:

- G_S – расход продувочного воздуха;
- P_S – давление в ресивере компрессора;
- T_S – температура воздуха в ресивере компрессора;
- P_T – давление газа в ресивере турбины;
- T_T – температура газа в ресивере турбины;
- G_T – расход газа на входе турбину;
- P_b – давление газа в точке «b» индикаторной диаграммы;
- T_b – температура газа в точке «b» индикаторной диаграммы;
- G_b – расход газа в точке «b» индикаторной диаграммы;
- P_K – давление за компрессором;
- G_K – расход компрессора;
- T_X – температура за охладителем воздуха;
- n – скорость вращения дизеля;
- n_z – заданная скорость вращения дизеля (задается ДАУ);
- S_z – заданный шаг ВРШ (задается ДАУ);
- S_f – заданный шаг ВРШ
- h – относительная подача топлива (индекс топливного насоса) – задается регулятором скорости;
- n_{TK} – скорость вращения турбокомпрессора (турбонаддувочного агрегата).

Следует отметить, что авторы не претендуют на создание методик для проектирования дизелей, гребных винтов и турбонаддувочных агрегатов. Автор считает, что пропульсивный комплекс укомплектован готовыми агрегатами с известными параметрами номинального режима и известными характеристиками.

1.2. Индикаторная диаграмма

Индикаторная диаграмма рассматривается по В. И. Гринецкому – Е. К. Мазингу. Учитывая, что дизель и его параметры на номинальном режиме известны, можно использовать этот приближенный подход. На графике рис. 2 показана зависимость окружной составляющей давления в цилиндре от угла поворота коленчатого вала полученные по предлагаемой методике, эмпирическим формулам Ллойда и полуэмпирическим формулам Вейца и Качуры [6].

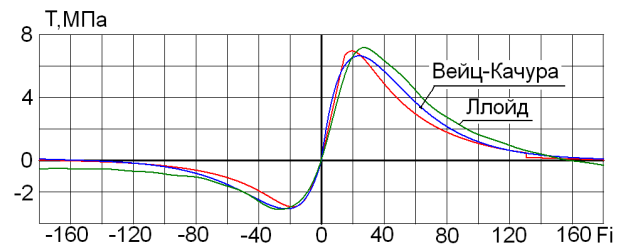


Рис. 2. Зависимость окружной составляющей давления в цилиндре от угла поворота

На рис. 2 видно, что графики плотно ложатся друг на друга. Это позволяет сделать вывод о целесообразности глубже рассматривать процессы в цилиндре для рассматриваемой задачи. В [3] получен график процесса рис. 3.

На рис. 3 следующие обозначения:

- P_K – давление воздуха за компрессором (бары);
- P_T – давление газа в ресивере турбины (бары);
- t_T – температура газа в ресивере турбины (С);
- t_b – температура газа в точке «b» индикаторной диаграммы (С);

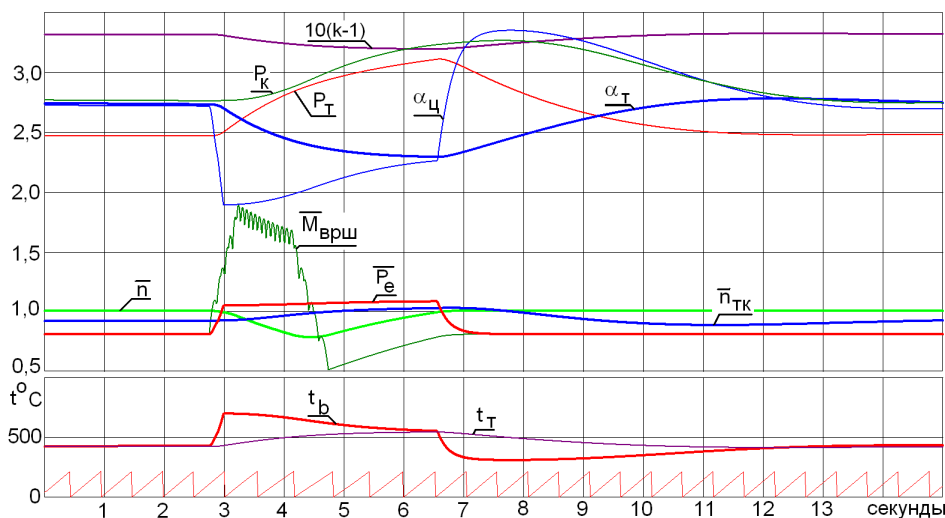


Рис. 3. Переходный процесс судового пропульсивного комплекса при ледовом воздействии

\bar{n} – скорость вращения дизеля (отнесенная к номиналу);

$\bar{n}_{\text{ТК}}$ – скорость вращения турбокомпрессора (турбонаддувочного агрегата) (отнесенная к номиналу);

k – коэффициент адиабаты в ресивере турбины;

\bar{P}_e – эффективное давление (отнесенное к номиналу);

$\alpha_{\text{ц}}$ и $\alpha_{\text{Т}}$ – коэффициенты избытка воздуха в цилиндре и в ресивере турбины;

На рис. 3 показан переходный процесс для пропульсивного комплекса с ВРШ при стандартном ледовом воздействии (14 ударов лопасти винта о лед). Видно увеличение скорости вращения турбонаддувочного агрегата и существенный, но не опасный провал скорости вращения дизеля.

1.3. Крутильные колебания

Для анализа крутильных колебаний используется расчетная схема рис. 4.

Согласно рис. 4 крутильная схема представлена валопроводом и коленчатым валом. На коленчатом валу упруго закреплены диски переменного момента инерции, которые имитируют шатунно-поршневую группу.

Движения шатунно-поршневой группы можно описать уравнением Н. И. Мерцалова

$$\ddot{\psi}_k \cdot J_{k \text{ пр}} = M_{\text{Дк}} - M_{\text{Мк}} - \frac{\psi_k^2}{2} \frac{d}{d\psi} (J_{k \text{ пр}}),$$

где ψ_k - угол поворота диска с номером k

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

$M_{\text{Дк}}$ - крутящий момент, приложенный к шатунно-поршневой группе от давления газов в цилиндре дизеля.

$M_{\text{Мк}}$ - крутящий момент, приложенный к шатунно-поршневой группе от взаимодействия шатунно-поршневой группы с коленчатым валом.

Момент от давления газов в цилиндре зависит от подачи топлива, давления продувочного воздуха

и угла поворота ψ_k диска с номером k . Для каждого цилиндра эти параметры могут быть разными, хотя методика для определения момента рис. 2 одинакова.

Крутящий момент от взаимодействия шатунно-поршневой группы с коленчатым валом может быть определен из следующего выражения

$$M_{\text{Мк}} = C_{\text{М}} \cdot (\psi_k - \phi_k),$$

где ϕ_k - угол поворота коленчатого вала в точке крепления к нему диска с номером k ,

$C_{\text{М}}$ - жесткость масляного слоя мотылевого подшипника. Вычислять эту жесткость нецелесообразно. Ее можно принять достаточно большой, чтобы она не влияла на результаты.

Момент инерции $J_{k \text{ пр}}$ это известная функция угла поворота. При этом следует отметить, что первая производная от угла вычисляется путем алгебраических вычислений. Пример такой функции показан на рис. 5.

На рис. 5 прямая линия это рекомендованное фирмой производителем значение для расчетов крутильных колебаний.

1.4. Волновое уравнение для валопровода

Для определения угла поворота коленчатого вала ϕ_k в точке крепления к нему диска с номером k достаточно рассмотреть волновое уравнение для системы коленчатый вал – валопровод - гребной винт. Это уравнение имеет вид

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} V^2 + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{dI}{dy} \frac{V^2}{I} + \frac{\ddot{\mu}}{\rho I},$$

где $V = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ – скорость распространения малых возмущений;

$\ddot{\mu}$ – внешний распределенный вдоль оси вала крутящий момент;

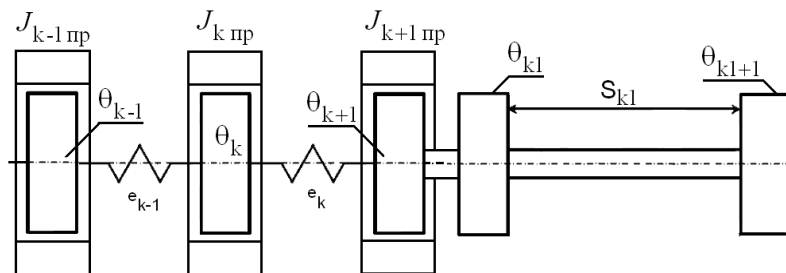


Рис. 4. Расчетная крутильная схема дизеля с составными дисками

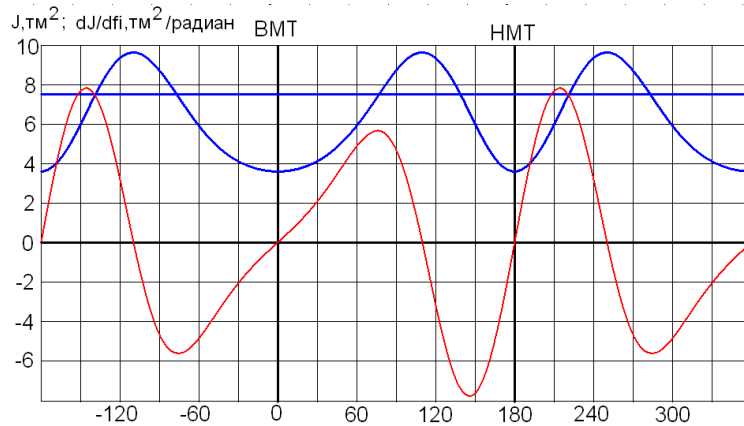


Рис. 5. Расчетные значения момента инерции и его первой производной

I_k – полярный момент инерции сечения вала; иногда инерционные параметры вала задают полярным моментом инерции вала $J_k = I_k \cdot \rho_k \cdot S_k$;

ρ_k – плотность материала вала с номером k .

Решение волнового уравнения ищем в следующем виде

$$\phi_j = \lambda_j(t) \cdot Z_j(y),$$

где j – номер, рассматриваемой формы колебаний;

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

$Z_j(y)$ – функция от координаты сечения y – форма колебаний с номером j .

Если в системе действуют демпфирующие моменты (функции от первых производных) то не нулевые граничные условия, вообще говоря, не выполняются. Это означает, что при наличии вязкого трения нельзя представлять систему как комбинацию весоных или невесоных цилиндрических валов, которые соединяют весоные диски потому, что граничные условия на дисках не будут выполнены при вынужденных колебаниях.

Следовательно, целесообразно рассмотреть систему коленчатый вал – валопровод как один вал переменного сечения (диск рассматривается как участок вала). При этом на торцах такого вала будут нулевые граничные условия. Весомый диск, который рассматривается как участок вала, должен по своим краям иметь переходные участки с целью получения ортогональных форм.

Форма для участка переменного сечения [5] описана следующим уравнением

$$z'' + z' \frac{I'}{I} + z \left(\frac{P}{V} \right)^2 = 0.$$

Это уравнение можно решить аналитически, если положить

$$\frac{I'}{I} = 2n.$$

В этом случае уравнение преобразуется к виду

$$z'' + 2 \cdot n \cdot z' + z \left(\frac{P}{V} \right)^2 = 0.$$

Значением числа n следует задаться. В приведенных примерах $n = 50$. Тогда момент инерции сечения изменяется по следующему закону

$$I = I_0 e^{2n}.$$

Получим стандартное аperiодическое (экспоненциальное) решение, которое позволяет определить значение формы и ее первой производной в конце участка и состыковать участок с предыдущим.

Следует отметить, что переходный участок есть ни что иное, как скругление (фаска, галтель), которое, как правило, делают при переходе валов с одного диаметра на другой.

Если найдены формы и частоты (это не собственные частоты всей системы) для коленчатого вала и валопровода то исходное уравнение можно преобразовать к следующему виду

$$\sum_{j=0}^{j_1} \rho \cdot I \cdot Z_j (\ddot{\lambda}_j + \dot{\lambda}_j \cdot P_j^2) = \ddot{m}.$$

В этом уравнении j_1 – число рассматриваемых форм. Теоретически j_1 равно бесконечности – реально не более пяти. Если формы ортогональны (тогда и только тогда), то уравнение распадется на j_1

уравнений. Для этого достаточно умножить его на любую из форм и проинтегрировать вдоль длины. Для формы с номером i рассматриваемое выражение можно преобразовать к следующему виду

$$\ddot{\lambda}_i + \dot{\lambda}_i \cdot P_i^2 = \frac{\int \tilde{\mu} \cdot Z_i dy}{\int \rho \cdot I \cdot Z_i^2 dy}$$

или

$$\ddot{\lambda}_i + \dot{\lambda}_i \cdot P_i^2 = \frac{\sum (M_{Mk} \cdot Z_{ik})}{\int \rho \cdot I \cdot Z_i^2 dy}.$$

Следует отметить, что эти выражения имеют одинаковый вид для случая переменного и постоянного сечения вала.

Решение этих уравнений позволяет вычислить

$$\phi_k = \phi_0 + \lambda_1 \cdot Z_{1k} + \lambda_2 \cdot Z_{2k} + \dots$$

Выводы

Предложенная расчетная схема и математическая модель позволяют достаточно строго для инженерного подхода определить параметры нестационарных переходных процессов для судового пропульсивного комплекса как неконсервативной системы.

Литература

1. Тарасенко, А. И. Расчет динамических характеристик системы «винт–валопровод–главный двигатель» на основе решения волнового уравнения [Текст] / А. И. Тарасенко // Динамика и прочность : сб. науч. тр. – Николаев : НКИ, 1985. – С. 45–53.

2. Тарасенко, А. И. Переходные процессы в системе «винт–валопровод–малооборотный дизель» при мощном ледовом воздействии [Текст] / А. И. Тарасенко // Динамика и надежность судовых машин : сб. науч. тр. – Николаев : НКИ, 1989. – С. 99–106.

3. Тарасенко, А. И. Работа пропульсивного судового малооборотного дизельного комплекса в условиях ледового плавания [Текст] / А. И. Тарасенко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 10 (117). – С. 105–110.

4. Тарасенко, А. И. Широкодиапазонная дина-

мическая модель ГТД [Текст] / А. И. Тарасенко, А. А. Тарасенко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 9 (96). – С. 243–247.

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

6. Вейц, В. Л. Динамика машинных агрегатов с двигателями внутреннего сгорания [Текст] / В. Л. Вейц, А. Е. Кочура. – Л. : Машиностроение, 1976. – 384 с.

References

1. Tarasenko, A. I. Raschet dinamicheskikh harakteristik sistemy «vint–valoпровод–glavnyj dvigatel'» na osnove reshenija volnovoogo uravnenija [“Propeller-shafting-main engine” system dynamic performances analysis on base of wave equation solution]. *Dinamika i prochnost' : sb. nauchn. Tr. – Collection of scientific papers “Dynamics and strength”*, Nikolaev, NKI Publ., 1985, pp. 45-53.

2. Tarasenko, A. I. Perehodnye processy v sisteme «vint-valoprovod-malooborotnyj dizel'» pri moshhnom ledovom vozdejstvii [Transient processes in system “Propeller – shafting – low-speed diesel” at power ice action]. *Dinamika i nadezhnost' sudovyh mashin : sb. nauchn. Tr. – Collection of scientific papers “Dynamics and reliability”*, Nikolaev, NKI Publ., 1989, pp. 99–106.

3. Tarasenko, A. I. Rabota propul'sivnogo sudovogo malooborotnogo dizel'nogo kompleksa v uslovijah ledovogo plavanija [Work of propulsive system on a low speed diesel in conditions of ice navigation]. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, 2014, no. 10 (117), pp. 105–110.

4. Tarasenko, A. I., Tarasenko, A. A. Shirokodiapazonnaja dinamicheskaja model' GTD [Turbine engine wide-range dynamic model]. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, 2012, no. 9 (96), pp. 243–247.

5. Tarasenko, A. I. Krutit'nye kolebanija razvetvlennoogo ne simmetrichnogo propul'sivnogo sudovogo dizel'nogo kompleksa [Torsional oscillations of branching non-symmetrical propulsive marine diesel complex]. *Dvigateli vnutrennego sgoranija*, Kharkov, NTU “HPI” Publ., 2013, no. 1, pp. 37–42.

6. Vejc, V. L., Kochura, A. E. *Dinamika mashinnyh agregatov s dvigateljami vnutrennego sgoranija* [Dynamics of gangs with internal combustion engines]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1976. 384 p.

Поступила в редакцию 22.05.2016, рассмотрена на редколлегии 16.06.2016

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

НЕСТАЦІОНАРНІ КРУТИЛЬНІ КОЛИВАННЯ ДИЗЕЛЯ З УРАХУВАННЯМ ЗМІННОСТІ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ ВІДСІКУ

О. І. Тарасенко, А. О. Тарасенко

Розглядається судновий пропульсивний комплекс який складається з мало обертового дизеля, гвинта, крок якого регулюється, та валопроводу, в якому вмонтовано механізм змінення кроку гвинта. Для створення моделі розглянуто турбонаддувочний агрегат с ресиверами компресора та турбіни. При розгляданні дизеля було враховано модель регулятора швидкості. При розгляданні пропульсивного комплексу було враховано модель системи дистанційного автоматичного управління (ДАУ) дизеля. При аналізі крутильних коливань в валопроводі враховано змінний момент інерції відсіків дизеля та похідну від нього.

Ключові слова: дизель, турбонаддувочний агрегат, гвинт змінного кроку, регулятор швидкості, системи дистанційного автоматичного управління (ДАУ) дизеля, крутильні коливання.

TRANSIENT TORSIONAL VIBRATIONS OF DIESEL GIVEN THE VARIABILITY THE MOMENT OF INERTIA OF THE COMPARTMENT

A. I. Tarasenko, A. A. Tarasenko

We study the ship's propulsion system consisting of low-speed diesel engines, controllable pitch propeller and pitch changing mechanism mounted in the shaft. To create the model considered turbocharger unit with receivers of compressor and turbine. Viewing a diesel engine speed controller model was taken into account. Viewing the propulsion system model of the remote automatic control system diesel was into account. Analyzing of torsional vibrations in the shafting a variable moment of inertia of the diesel engine compartments and the derivative of it is taken into account.

Keywords: diesel, turbocharger unit, controllable pitch propeller (CPP), velocity control, remote automatic control system (RAC) torsional oscillation.

Тарасенко Александр Иванович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри механіки и конструирования машин Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: tai777@ukrpost.net.

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

Tarasenko Aleksandr Ivanovich – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Theoretical Mechanics and design Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine, 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.