

УДК 621.438:

А. И. ТАРАСЕНКО

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

РАБОТА ПРОПУЛЬСИВНОГО СУДОВОГО МАЛОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ

Рассматривается судовой пропульсивный комплекс, состоящий из малооборотного дизеля, винта регулируемого шага и валопровода, в котором смонтирован механизм изменения шага. Для создания модели рассмотрен турбонаддувочный агрегат с ресиверами компрессора и турбины. При рассмотрении дизеля учтена модель регулятора скорости. При рассмотрении пропульсивного комплекса учтена модель системы дистанционного автоматического управления (ДАУ) дизеля. Система ДАУ формирует задание для регулятора скорости дизеля и для механизма изменения шага винта. Ледовое воздействие принято стандартным для классификационного общества DET NORSKE VERITAS (DNV). Приведены графики переходных процессов для разных исходных состояний дизеля.

Ключевые слова: дизель, турбонаддувочный агрегат, винт регулируемого шага, регулятор скорости, система дистанционного автоматического управления, ледовое воздействие.

Введение

В рождественские предновогодние дни 2013 года все мировые средства массовой информации заполнены сообщениями о том, что российское научно-исследовательское судно ледового класса «Академик Шокальский» застряло во льдах Антарктики. Совершить успешный ледовый маневр и снять все 52 пассажира с судна удалось 2 января китайскому судну «Сюэ Лун» – «Снежный дракон». На Херсонском судостроительном заводе построены четыре судна: два для России - «Иван Папанин» (1990 год) и «Юпитер» (1991 год), а потом уже в 1993 году - «Снежный дракон» для Китая.

Преимущество этих судов – прямая передача от главного двигателя, дизеля, на винт регулируемого шага (ВРШ) с уникальной системой слежения между ВРШ и главным двигателем, и установкой выносного упорного подшипника. Как правило, все остальные ледоколы – на электродвижении. Все выше сказанное есть цитата из статьи В. Бабича «Снежный дракон» идет на помощь. Эта статья опубликована в периодическом издании г. Николаева.

Автор имел честь сотрудничать с организацией спроектировавшей это судно. Сотрудничество заключалось в моделировании крутильных колебаний [1], в моделировании переходных процессов при взаимодействии винта со льдом [2], в разработке и изготовлении имитатора судового пропульсивного комплекса для проведения межведомственных испытаний (МВИ) системы ДАУ судов ледового плавания и участие автора в этих испытаниях. Отдельно автор хочет указать

на статью [3], опубликованную им по личной просьбе идеолога создания силовой установки этих судов – Ищенко Бориса Антоновича.

Эта статья посвящена некоторым аспектам установки выносного упорного подшипника.

Настоящая статья посвящена переходным процессам в системе малооборотный дизель (МОД) – винт регулируемого шага (ВРШ) при взаимодействии ВРШ со льдом в условиях ледового плавания.

В работах [1, 2] автором рассмотрен комплекс вопросов касающихся системы (МОД) - (ВРШ) в условиях ледового плавания. Более того, результаты этих работ использованы при реальном проектировании судов ледового плавания. Разработанные автором в настоящее время универсальные широкодиапазонные модели не только не решили старых вопросов, а добавили новые. Доклад части материала на 1st torsional vibration symposium в Зальцбурге вызвал интерес и автор решил для себя, что тогда, когда поджимали сроки, он делал, как мог, а сейчас надеется, что делает как надо.

1. Формулирование проблемы

Требуется получить систему обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих параметры системы дизель–валопровод–гребной винт в условиях мощного ледового воздействия. При формировании модели судового пропульсивного комплекса необходимо использовать дифференциальные уравнения, описывающие турбонад-

дувочный 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 на ледового плавания показана на рис. 1.

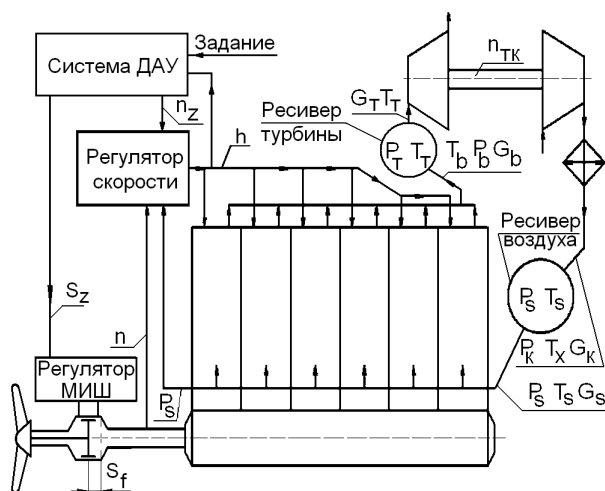


Рис. 1. Схема пропульсивного комплекса судна ледового плавания

На рисунке 1 показана схема пропульсивного комплекса и схема связей между отдельными агрегатами. На рисунке 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 в 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).

Малооборотный дизель (МОД) прямо действует на винт регулируемого шага (ВРШ). Вырабатываемая МОД мощность определена топливоподачей h (индексом рейки топливного насоса). Топливоподачу h определяет регулятор скорости. Этот регулятор учитывает давление в ресивере продувочного воздуха и осуществляет ограничение топливоподачи. Задание для регуляторов скорости и механизма изменения шага (МИШ) вырабатывает система ДАУ. В нормальных условиях система ДАУ вырабатывает задание регуляторам скорости и МИШ согласно заданию системе ДАУ. Если возникает ледовое воздействие, которое вызывает чрезмерное увеличение топливоподачи, то система ДАУ дает команду на уменьшение шага винта и нормализации топливоподачи.

Следует отметить, что автор не претендует 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. Особенности численного решения

Разрабатываемую систему дифференциальных уравнений планируется решить численным методом. В качестве численного метода можно использовать метод Хемминга или Рунге–Кутты. Во всех этих методах задача программиста – по известным значениям параметров найти первые производные этих параметров. Иными словами, числовые значения неизвестных переменных выдает численный метод, а задача программиста, получив эти числовые значения, вычислить первые производные.

В качестве переменных, первые производные которых требуется найти, используются следующие величины:

φ – угол поворота коленчатого вала дизеля;

n – скорость вращения дизеля;
 $n_{\text{тк}}$ – скорость вращения турбокомпрессора;
 $m_{\text{рт}}$ – масса газа в ресивере турбины;

$L_{\text{рт}} = m_{\text{рт}} / \mu_{\text{рт}}$ – количество газа в ресивере турбины в молях;

T_{T}^* – температура газа в ресивере турбины;

P_{S}^* – давление в ресивере компрессора.

Следовательно, математическая модель пропульсивного комплекса состоит из семи дифференциальных уравнений первого порядка. Остальные параметры определены алгебраическими уравнениями.

Для создания математической модели пропульсивного комплекса достаточно рассмотреть каждую составляющую этого комплекса.

1.3. Гребной винт

В условиях ледового плавания пропульсивный комплекс работает по швартовой характеристике. Действительно, судно в полынье идет с малой скоростью порядка 2 – 3 узла. На такой скорости мощность, потребляемая гребным винтом, зависит только от скорости вращения винта и положения лопастей. Это делает возможным использование винтовой характеристики. Крутящий момент, потребляемый гребным винтом

$$M_{\text{ВРШ}} = M_{\text{У}} \cdot (\bar{n})^2 + M_{\text{Л}},$$

где $M_{\text{Л}}$ – крутящий момент от взаимодействия гребного винта со льдом определен по методике DET NORSKE VERITAS (DNV);

$M_{\text{У}}$ – крутящий момент, установленный системой ДАУ для номинальной скорости вращения дизеля. Изменение S_f (шага ВРШ) ведет к изменению $M_{\text{У}}$.

1.4. Турбонаддувочный агрегат и дизель

Уравнения, записанные в [4] для газотурбинного двигателя, можно преобразовать к следующему виду:

$$\dot{P}_{\text{S}}^* = \bar{P}_{\text{S}}^* \cdot (\bar{g}_{\text{ouD}} - \bar{g}_{\text{inD}}) / \tau_{\text{рк}};$$

$$\dot{T}_{\text{T}}^* = \frac{\bar{P}_{\text{T}}^* \bar{g}_{\text{ouD}}}{\sqrt{\bar{T}_{\text{b}}^*}} \cdot \frac{T_{\text{b}}^* C_{\text{рпм}}^* - T_{\text{T}}^* C_{\text{рпм}}^*}{\tau_{\text{рт}} \bar{m}_{\text{рт}} C_{\text{р}}^*};$$

$$\dot{m}_{\text{рт}} = \left[\frac{\bar{g}_{\text{ouD}}}{\sqrt{\bar{T}_{\text{b}}^*}} - \frac{\bar{g}_{\text{inT}}}{\sqrt{\bar{T}_{\text{T}}^*}} \right] \cdot \frac{\bar{P}_{\text{T}}^*}{\tau_{\text{рт}}};$$

$$\dot{L}_{\text{рт}} = \frac{\bar{P}_{\text{T}}^*}{\tau_{\text{рт}}} \left[\frac{\mu_{\text{ртн}} \bar{g}_{\text{ouD}}}{\mu_{\text{b}} \sqrt{\bar{T}_{\text{b}}^*}} - \frac{\bar{g}_{\text{inT}}}{\sqrt{\bar{T}_{\text{рт}}^*}} \frac{\bar{L}_{\text{рт}}}{\bar{m}_{\text{рт}}} \right];$$

$$\dot{n}_{\text{тк}} = \frac{\bar{N}_{\text{T}} - \bar{N}_{\text{К}}}{\bar{n}_{\text{тк}} \cdot \tau_{\text{тк}}}.$$

Дизель даст еще два дифференциальных уравнения:

$$\dot{\bar{n}} = \frac{\bar{P}_{\text{е}} - \bar{M}_{\text{У}} \cdot \bar{n}^2 - \bar{M}_{\text{Л}}}{\tau_{\text{D}}};$$

$$\dot{\varphi} = n.$$

В этих уравнениях:

$\bar{g}_{\text{inD}} = \bar{n}$ – параметр расхода на входе в дизель;

$$\bar{g}_{\text{ouD}} = \left(\bar{n} + \frac{\frac{\bar{h}}{P_{\text{T}}^*} - \bar{n}}{\alpha_{\text{H}} L_0} \right) \sqrt{\bar{T}_{\text{b}}^*} \text{ – параметр расхода в}$$

точке b индикаторной диаграммы;

μ_{b} – молекулярная масса в точке b индикаторной диаграммы;

$\mu_{\text{рт}} = \mu_{\text{ртн}} \bar{m}_{\text{рт}} / \bar{L}_{\text{рт}}$ – молекулярная масса смеси газов в ресивере турбины;

$\tau_{\text{рт}} = m_{\text{ртн}} / G_{\text{bn}}$ – постоянная времени ресивера турбины;

$$\tau_{\text{тк}} = \frac{J \omega_{\text{H}}^2}{N_{\text{тн}}} \text{ – постоянная времени ротора турбокомпрессора;}$$

$P_{\text{е}}$ – эффективное давление. Это давление определяется путем анализа индикаторной диаграммы. Иногда $\bar{P}_{\text{е}}$ отождествляют с \bar{h} .

1.5. Индикаторная диаграмма

Анализ индикаторной диаграммы необходим для определения параметров потока в точке «b» и среднего эффективного давления. Индикаторная диаграмма рассматривается по В. И. Гриневецкому–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, по эмпирическим формулам Ллойда и полуэмпирическим формулам Вейца и Качуры [5].

На рисунке 2 видно, что графики плотно ложатся друг на друга. Это позволяет сделать вывод о нецелесообразности глубже рассматривать процессы в цилиндре для рассматриваемой задачи.

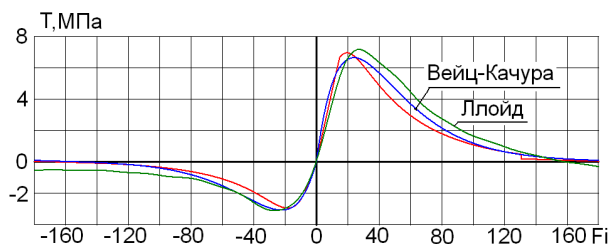


Рис. 2. Зависимость окружной составляющей давления в цилиндре от угла поворота

Исходными данными для расчета индикаторной диаграммы являются следующие параметры:

n_D – скорость вращения дизеля на номинальном режиме;

N_{cil} – цилиндровая мощность (мощность одного цилиндра) дизеля на номинальном режиме;

b_e – удельный расход топлива (в кг/(кВт час)) дизеля на номинальном режиме;

$\eta_{мех}$ – механический КПД двигателя;

D_{cil} – диаметр цилиндра;

S – ход поршня;

P_S – давление в ресивере компрессора на номинальном режиме;

ε – геометрическая степень сжатия;

T_X – температура воздуха за охладителем воздуха на номинальном режиме.

Результаты расчетов показаны на рис. 3 - 5.

На рисунках 3 – 5 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);

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

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

k – коэффициент адиабаты в ресивере турбины;

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

$\alpha_{ц}$ и α_T – коэффициенты избытка воздуха в цилиндре и в ресивере турбины.

На рисунке 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.

На рисунке 4 показан переходный процесс для пропульсивного комплекса с ВРШ при длительном ледовом воздействии (25 ударов лопасти винта о лед). Видно опасный провал скорости вращения дизеля и временное увеличение скорости вращения турбонаддувочного агрегата. На рисунке 5 показан переходный процесс для пропульсивного комплекса с винтом фиксированного шага (ВФШ) при длительном воздействии (25 ударов лопасти винта о лед). Видно недопустимый провал скорости вращения дизеля и недопустимое увеличение давления в ресивере продувочного воздуха, что может вызвать помпаж компрессора.

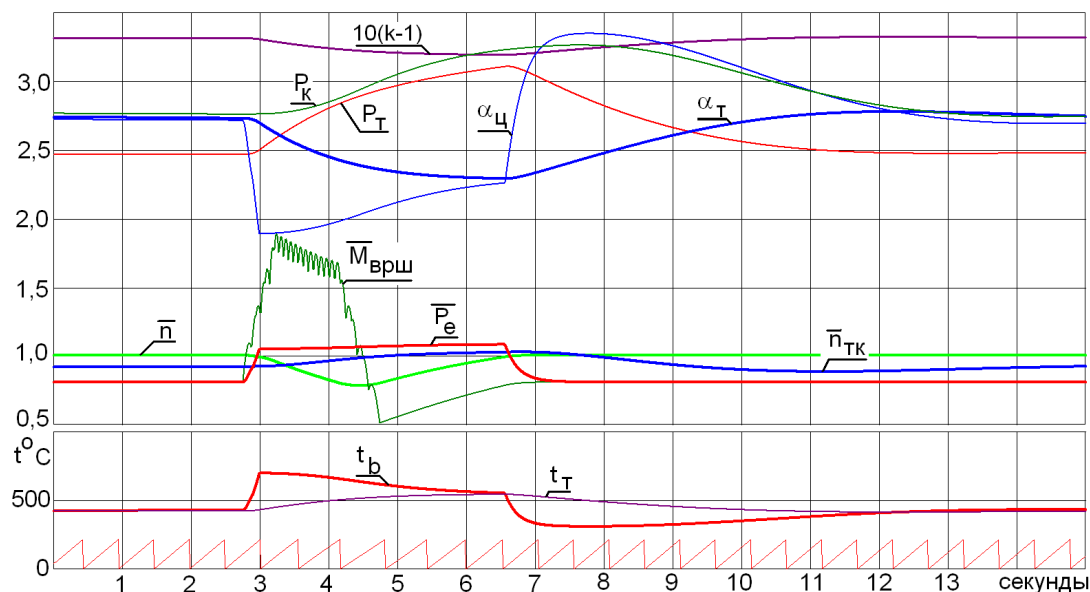


Рис. 3. Переходный процесс судового пропульсивного комплекса с ВРШ при стандартном ледовом воздействии (14 ударов)

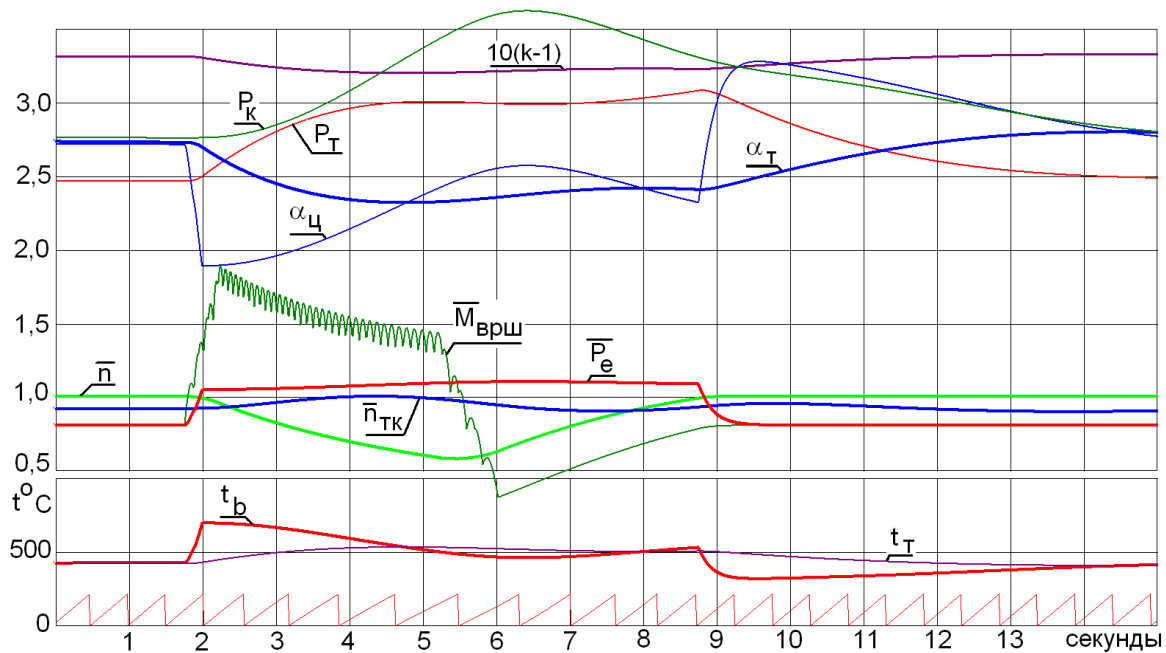


Рис. 4. Переходный процесс судового пропульсивного комплекса с ВРШ при длительном ледовом воздействии (25 ударов)

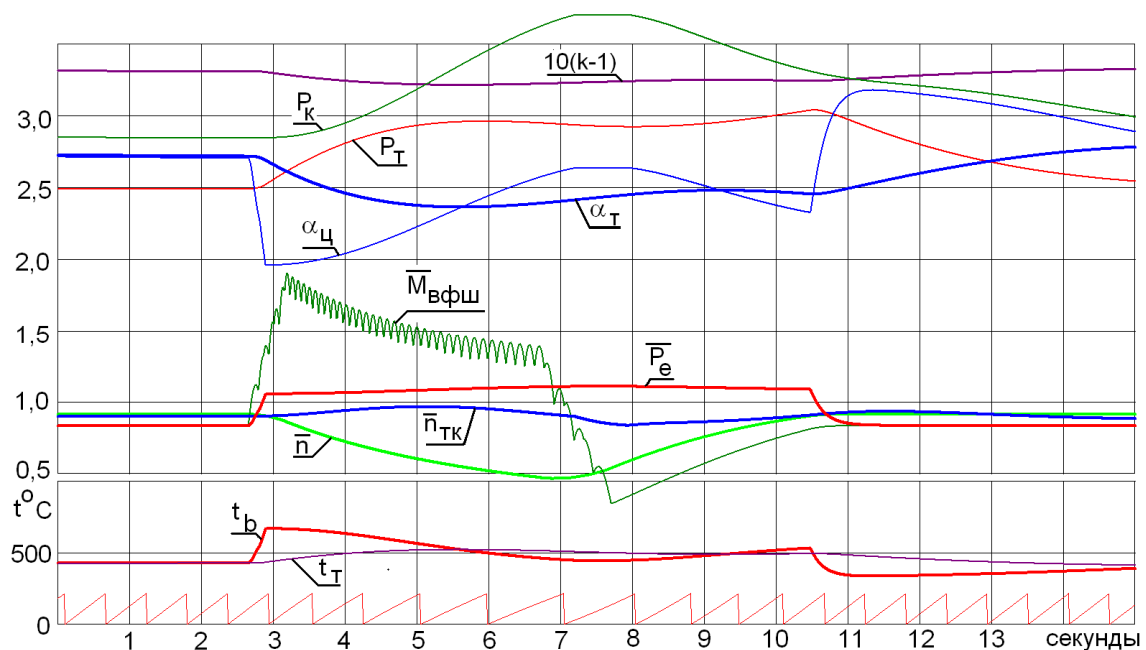


Рис. 5. Переходный процесс судового пропульсивного комплекса с ВФШ при длительном ледовом воздействии (25 ударов)

Следует подчеркнуть, что при использовании винта фиксированного шага мощность двигателя можно понизить только путем снижения скорости вращения дизеля. Одно из преимуществ применения ВРШ в том, что мощность двигателя можно уменьшить с помощью ВРШ сохраняя скорость вращения дизеля заданной. Для всех трех переходных процессов общим является повышение температуры на клапанах (точка «b» индикаторной диаграммы) и повышение давления продувочного воздуха. Повышение давления продувки означает, что ограничение топливоподачи работать

не будет и возможно опасное повышение давления при вспышке топлива в цилиндре. Очевидно, что срабатывание предохранительных клапанов приведет к остановке двигателя.

Заключение

Разработана математическая модель судового пропульсивного комплекса, позволяющая исследовать переходные процессы при мощном ледовом воздействии.

Выполненные на ЭВМ расчеты позволяют сделать следующие выводы:

1. Пропульсивный комплекс на основе малооборотного дизеля должен содержать ВРШ.
2. При движении во льдах скорость вращения дизеля необходимо поддерживать номинальной. Мощность двигателя регулируется с помощью ВРШ.
3. В условиях стандартных воздействий нет необходимости управлять ВРШ во время воздействия.

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. научн. 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. научн. тр. – Николаев : НКИ, 1989. – С. 99–106.

3. Тарасенко, А. И. Продольные колебания судовых валопроводов, содержащих несколько упорных подшипников [Текст] / А. И. Тарасенко // Динамика и прочность : сб. научн. тр. – Николаев : НКИ, 1988. – С. 85–92.

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

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

Поступила в редакцию 11.06.2014, рассмотрена на редколлегии 17.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.Р. Ткач, Национальный университет кораблестроения, Николаев.

РОБОТА ПРОПУЛЬСИВНОГО СУДНОВОГО МАЛООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ В УМОВАХ ЛЕДОВОГО ПЛАВАННЯ

О. І. Тарасенко

Розглядається судновий пропульсивний комплекс, що складається з малооборотного дизеля, гвинта регульованого кроку та валопроводу, в якому вмонтовано механізм змінення кроку. Для створення моделі розглянуто турбонаддувочний агрегат з ресиверами компресора та турбіни. При розгляданні дизеля враховано модель регулятора швидкості. При розгляданні пропульсивного комплексу враховано модель системи дистанційного автоматичного управління (ДАУ) дизеля. Система ДАУ формує завдання для регулятора швидкості дизеля і для механізму змінення кроку гвинта. Момент викликаний льодом прийнято стандартним для класифікаційного товариства *DET NORSKE VERITAS (DNV)*. Наведено графіки перехідних процесів при різних початкових станах дизеля.

Ключові слова: дизель, турбонаддувочний агрегат, гвинт змінного кроку, регулятор швидкості, система дистанційного автоматичного управління (ДАУ) дизеля, льодова дія.

WORK OF PROPULSIVE SYSTEM ON A LOW SPEED DIESEL IN CONDITIONS OF ICE NAVIGATION

A. I. Tarasenko

We examine the ship propulsion system consisting of a slow-speed diesel engine, controllable pitch propellers and shafting mounting the pitch change mechanism. To create the model is examined a turbocharger unit with receivers of compressor and turbine. In reviewing a diesel the speed controller model was taken into account. In reviewing the propulsion system the model of remote automatic control system (RAC) of diesel is also taken into account. RAC system creates a task to the speed controller for diesel and the mechanism of the change of pitch. Ice impact is considered standard for the classification society *DET NORSKE VERITAS (DNV)*. Shows graphs of transient processes for different initial states of diesel.

Key words: diesel, turbocharger unit, controllable pitch propeller (CPP), velocity control, remote automatic control system (RAC) ice impact.

Тарасенко Александр Иванович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры механики и конструирования машин, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: tai777@ukrpost.net.