

В.А. Яровенко, П.С. Черников

МЕТОД РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОХОДОВ

Метою роботи є розробка методу розрахунку перехідних режимів гребних електроенергетичних установок у складі судових пропульсивних комплексів. Методика. На маневрах тривалості перехідних режимів в електроенергетичній установці сумірні з перехідними режимами роботи судна. Тому аналіз маневрених режимів її роботи слід проводити в єдності з усіма складовими частинами судового пропульсивного комплексу. Результати. Розроблені уточнена математична модель і метод розрахунку перехідних режимів всіх складових частин пропульсивного комплексу електрохода на маневрах. Знайдено безрозмірні параметри комплексу. Вони визначають основні показники якості маневрування. Адекватність моделі і методу розрахунку підтверджено порівнянням результатів математичного моделювання з натурними експериментами. Наукова новизна. Метод розрахунку дозволяє розраховувати динамічні режими роботи всіх складових частин пропульсивного комплексу. З'являється можливість проектування гребних електроенергетичних установок по кінцевому результату – за показниками якості маневрування судна. Практичне значення. Метод розрахунку дозволяє проводити всебічні дослідження пропульсивних комплексів на маневрах і знаходити можливості підвищення маневреності електроходів. Бібл. 21, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: електроенергетична установка електрохода, математична модель перехідних режимів, метод розрахунку.

Целью работы является разработка метода расчета переходных режимов гребных электроэнергетических установок в составе судовых пропульсивных комплексов. Методика. На маневрах продолжительности переходных режимов в электроэнергетической установке соизмеримы с переходными режимами работы судна. Поэтому анализ маневренных режимов ее работы следует проводить в единстве со всеми составными частями судового пропульсивного комплекса. Результаты. Разработаны уточненная математическая модель и метод расчета переходных режимов всех составных частей пропульсивного комплекса электрохода на маневрах. Найдены безразмерные параметры комплекса. Они определяют основные показатели качества маневрирования. Адекватность модели и метода расчета подтверждены сравнением результатов математического моделирования с натурными экспериментами. Научная новизна. Метод расчета позволяет рассчитывать динамические режимы работы всех составных частей комплекса. Появляется возможность проектирования гребных электроэнергетических установок по конечному результату – по показателям качества маневрирования судна. Практическое значение. Метод расчета позволяет проводить исследования поведения пропульсивных комплексов на маневрах и отыскивать пути повышения маневренности электроходов. Библ. 21, табл. 2, рис. 3.

Ключевые слова: электроэнергетическая установка электрохода, математическая модель переходных режимов, метод расчета.

Актуальность задачи. В последние годы в мировом судостроении заметно повысился интерес к использованию электродвижения на судах торгового и военно-морского флота. Это обусловлено рядом неоспоримых преимуществ, свойственных такому способу передачи энергии на гребные винты: возможностью применения быстроходных тепловых двигателей (ТД), использованием двигателей упрощенной конструкции (устанавливаются неререверсивные ТД), дроблением полной мощности на несколько частей и возможностью работы каждого теплового двигателя на несколько винтов (что повышает живучесть и гибкость энергетической установки), уменьшением длины валов, широким использованием систем автоматики. Важнейшим преимуществом электродвижения перед традиционным приводом судовых движителей является возможность обеспечения высоких маневренных свойств судов, оборудованных таким типом энергетической установки. Именно маневренные качества гребной установки обеспечивают в первую очередь безопасность выполнения судами маневренных операций.

Современные гребные электрические установки (ГЭУ) строятся на основе асинхронных частотно-управляемых электродвигателей и на базе вентильных гребных электродвигателей. В то же время, в эксплуатации находится большое число судов, энергетические установки которых выполнены по системе переменного тока. В связи с этим, весьма актуальными являются как вопросы проектирования современных

электроходов с высокими маневренными свойствами, так и задачи совершенствования управления гребными энергетическими установками судов, находящихся в эксплуатации. Причем, необходимость в оценке маневренных свойств вновь строящихся электроходов возникает уже на начальных стадиях их проектирования, а повышение эффективности выполнения маневренных операций существующих судов несомненно актуально на любой стадии их жизненного цикла.

Состояние рассматриваемого вопроса. Отличительной особенностью работы электроходов на маневрах является то, что продолжительности переходных процессов в судовой электроэнергетической установке (СЭЭУ) оказываются соизмеримыми с продолжительностями переходных процессов движения самого судна. Поэтому, традиционные допущения о постоянстве частоты вращения гребных винтов при движении судна на маневрах (равно как и наоборот) не приемлемы. Все составные части комплекса электрохода находятся в тесной взаимосвязи. Лишь при решении частных задач позволительно рассматривать какой-либо элемент единого пропульсивного комплекса в отрыве от остальных. (Это, в частности, относится к установившемуся движению). При анализе же неустановившихся режимов гребные электроэнергетические установки следует рассматривать в единстве со всеми остальными элементами пропульсивного комплекса, включающего в себя СЭЭУ, гребные винты и корпус судна. Только в

© В.А. Яровенко, П.С. Черников

такой постановке можно провести обстоятельный анализ их маневренных режимов работы и оценить маневренные свойства электрохода.

Анализ состояния рассматриваемого вопроса показывает следующее. Исследования переходных режимов работы гребных электроэнергетических установок имеют давнюю историю. В многочисленных научных трудах достаточно глубоко рассматриваются вопросы аналитических и машинных методов расчета основных маневренных режимов – пуска, остановки, реверса гребных электродвигателей. Однако и по настоящее время всем им свойственен серьезный недостаток. На практике под системой электродвижения подразумевали и подразумевают обычно только электрическую часть гребной электроэнергетической установки (генераторы, гребные электродвигатели, преобразователи, пульты, посты управления) без первичных двигателей и движителей. В частности, это четко представлено в работах [1-4]. Основной отличительной особенностью этих и других основательных работ является то, что скорость движения судна считается постоянной на протяжении рассматриваемых маневров. Таким образом, гребная электрическая установка рассматривается в отрыве от единого судового пропульсивного комплекса. Конечно, в результате такого упрощения существенно облегчается анализ маневренных режимов работы ГЭУ, но вместе с тем, точность получаемых результатов снижается и, что самое главное, нарушается системный принцип подхода к анализу режимов работы судовых электроэнергетических установок. Нет возможности оценить эффективность работы электроэнергетической установки по «конечному результату» – по показателям качества выполнения маневра электроходом в целом.

Второй отличительной особенностью проведенных ранее исследований является то, что подавляющее их большинство выполнено применительно к конкретным электроходам (в лучшем случае – к конкретным сериям электроходов), к конкретным гребным электрическим установкам. Результаты расчетов, получаемые с помощью этих методов, относятся к конкретным СЭУ и не могут быть распространены на другие электроходы. Это не позволяет проводить широких обоснованных научных обобщений. Тем самым снижается научная ценность результатов проведенных исследований.

Попытка устранить отмеченные недостатки была предпринята одним из авторов этой статьи в работе [5]. Для анализа маневренных режимов гребных электроэнергетических установок в составе пропульсивных комплексов электроходов им разработана соответствующая математическая модель. Она описывает переходные режимы работы всех составных частей комплекса. Модель универсальна, охватывает подавляющее большинство современных и перспективных электроходов с традиционным типом движителей. В то же время, при описании процессов, происходящих в тепловых двигателях, был принят ряд допущений, не позволяющих анализировать динамические режимы их работы. Кроме того, математическое описание процессов, происходящих в синхронных генераторах, было построено на основе векторной диаграммы генератора, что также не давало возможности в полной мере оценить динамические режимы их работы. Таким образом,

математическое описание переходных режимов работы дизель-генераторов нуждается в доработке, что и обусловило необходимость настоящей работы.

Целью статьи является разработка уточненной математической модели переходных режимов гребных электроэнергетических установок электроходов и метода расчета на ее основе маневренных режимов работы судов.

Решение поставленной задачи проведено применительно к наиболее распространенной системе электродвижения – на базе частотно-управляемых асинхронных гребных электродвигателей.

Метод решения задачи. Структурная схема СЭУ «тепловой двигатель – синхронный генератор – преобразователь частоты – асинхронный двигатель» пропульсивного комплекса электрохода представлена на рис. 1. Она соответствует общепринятому в теории электродвижения варианту компоновки электроэнергетической установки [14, 16, 20]. В то же время, в соответствии с поставленной целью, а именно – в необходимости совершенствования проектирования и управления электроэнергетическими установками по показателям качества выполнения маневренных операций именно судном, в нее дополнительно включены гребные винты, руль и корпус электрохода.

В состав пропульсивного комплекса входят два «силовых» контура. Здесь: тепловые двигатели – D , синхронные генераторы (СГ) – G , частотные преобразователи электроэнергетики – SE , асинхронные гребные электродвигатели (ГЭД) – M , гребные винты – P , руль – H и корпус судна.

Элементы системы автоматического регулирования и основные параметры, связывающие силовые блоки и управляющие сигналы: регуляторы частоты вращения первичного двигателя – DR ; автоматические регуляторы напряжения генератора – GR ; M_D и ω_D – вращающий момент и угловая скорость вращения теплового двигателя; M_G – электромагнитный момент генератора; U_d и U_q – напряжения генератора по продольной и поперечной осям (внутренние координаты); I_d и I_q – токи генератора по продольной и поперечной осям (внутренние координаты); U_G – напряжение на выходе генератора; ω_{Set} – уставка угловой скорости вращения регулятора скорости; ξ_D – ход рейки топливного насоса; $\Delta\xi_D$ – приращение хода рейки топливного насоса; $1/T_{sp}$ – звено сервомотора; K_{Fb} и K_{is} – коэффициенты усиления звеньев жесткой и гибкой (изодромной) обратных связей; U_f и I_f – напряжение и ток возбуждения синхронного генератора; I_G , I_M – токи СГ и ГЭД; α_{Set} и γ_{Set} – относительные частота и напряжение преобразователя (задающие значения); α и γ – относительные частота и напряжение на выходе преобразователя (с учетом обратных связей); FC – функциональный преобразователь, формирующий закон частотного управления $\gamma = f(\alpha)$; M_p и P_p – момент и упор гребных винтов; M_M и ω_M – вращающий момент и угловая скорость вращения ГЭД.

В качестве регуляторов скорости вращения теплового двигателя применяются [8, 9] изодромные все-режимные регуляторы непрямого действия. В качестве регуляторов напряжения синхронных генераторов используются [9, 10] комбинированные (по управляющему воздействию и по отклонению регулируемой величины) регуляторы.

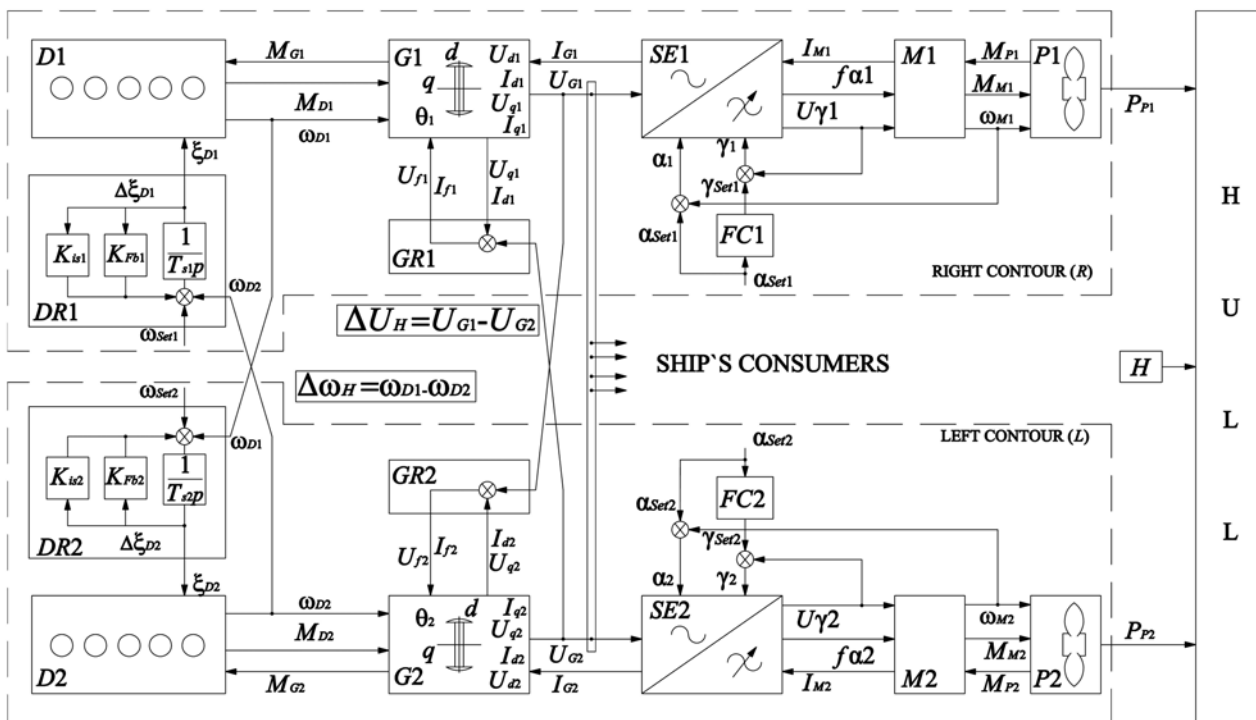


Рис. 1. Структурная схема пропульсивного комплекса электрохода

Система уравнений, описывающих переходные режимы работы электроэнергетической установки в составе пропульсивного комплекса электрохода, представлена ниже.

Для придания общности результатам анализа модель приведена к относительным единицам. В результате этого выявлены критерии динамического подобия пропульсивных комплексов. Это – безразмерные параметры системы «тепловые двигатели – гребная электрическая установка – движители – корпус судна». Найдены диапазоны изменения значений этих параметров, охватывающие большинство серий электроходов с традиционным приводом гребных винтов. Именно эти параметры и определяют текущие значения относительных режимных показателей всех составных частей комплекса и определяют численные значения основных показателей качества маневрирования. Такой подход позволяет придать общность получаемым результатам – электроходы с равными значениями безразмерных параметров будут иметь соответственно одинаковые значения (в относительных единицах) показателей качества маневрирования. Появляется возможность в обобщении результатов исследований.

Относительные значения режимных показателей будут обозначаться символом с чертой. (Индекс «0» соответствует значениям режимных показателей, при работе электрохода в номинальном установившемся режиме).

Например, относительный электромагнитный момент генератора:

$$\overline{M_G} = \frac{M_G}{M_{G0}}$$

Для упрощения восприятия материала термин «относительный» в дальнейшем тексте опущен.

Относительное время определяется иначе:

$$T = \frac{v_0}{L} t,$$

где v_0 – скорость судна, L – длина судна, t – текущее время.

Окончательный вариант обобщенной математической модели переходных и установившихся режимов работы пропульсивных комплексов электроходов представлен ниже.

Тепловой двигатель и регулятор скорости его вращения.

Уравнение движения теплового двигателя [5]:

$$\frac{d\overline{\omega_D}}{dT} = N_D (\overline{M_D} - \overline{M_G}), \quad (1)$$

где

$$N_D = \frac{M_{D0} L}{J_D \omega_{D0} v_0} \quad (2)$$

критерий динамического подобия, J_D – приведенный к валу теплового двигателя момент инерции двигателя и генератора.

Вращающий момент теплового двигателя можно представить как относительное перемещение рейки топливного насоса [8]:

$$\overline{M_D} = \overline{\xi_D}. \quad (3)$$

Мощность теплового двигателя:

$$\overline{P_D} = \overline{M_D} \overline{\omega_D}. \quad (4)$$

Уравнения переходных процессов в регуляторе скорости вращения теплового двигателя, с учетом жесткой и гибкой обратных связей и с учетом работы системы распределения активной мощности (при параллельно работающих генераторных агрегатах (ГА)), могут быть представлены как [9, 10].

Приращение хода рейки топливного насоса:

$$\frac{d\bar{\xi}_D}{dT} = K_P \left(1 - \left(\bar{\omega}_D - \Delta\bar{\omega}_H \right) \right) - K_{Fb} \bar{\Delta\xi}_D - K_{is} \bar{\Delta\xi}_D, \quad (5)$$

где K_P , K_{Fb} , K_{is} – коэффициенты усиления по регулируемой величине (изменению скорости вращения теплового двигателя), жесткой обратной связи и гибкой (изодромной) обратной связи соответственно;

$$\bar{\Delta\omega}_{H1} = \int_0^t \bar{U}_{s1} dt - \quad (6)$$

разность угловых частот вращения генераторов;

$$\bar{U}_{s1} = \frac{\bar{I}_{ae1} - \bar{I}_{ae2}}{k_{ae1}} - \quad (7)$$

напряжение на серводвигателе; k_{ae} – коэффициент усиления контура автоматического регулирования системы распределения активной нагрузки;

$$\bar{I}_{ae1} = \bar{U}_{d1} \bar{I}_{d1} + \bar{U}_{q1} \bar{I}_{q1}, - \quad (8)$$

активная составляющая тока СГ.

Для теплового двигателя второго генераторного агрегата уравнения записываются аналогично.

Синхронный генератор и система автоматического регулирования напряжения. В отличие от «классического» [11] описания СГ здесь не учитываются процессы, несоизмеримые с постоянными времени основных составных частей пропульсивного комплекса электрохода, а именно – трансформаторные ЭДС в статорных обмотках [12]. В виду малости пренебрегаем активным сопротивлением якоря [13], взаимной индуктивностью, которая несоизмеримо мала по сравнению с индуктивностью обмотки возбуждения, а также потокосцеплениями демпферных обмоток.

В состав комбинированной системы автоматического регулирования напряжения синхронных генераторов включен контур регулирования распределения реактивной мощности (при параллельно работающих ГА).

Угол коммутации:

$$\gamma_G = \arccos \left(1 - K_{\gamma G} \frac{|\bar{I}_G|}{|\bar{U}_G|} \right), \quad (9)$$

где

$$K_{\gamma G} = \frac{0,5(3x_d'' + x_q'')}{\sqrt{6}}, \quad (10)$$

x_d'' и x_q'' – сверхпереходные индуктивные сопротивления по осям d и q .

Угол сдвига фаз между векторами \bar{I}_G и \bar{U}_G :

$$\varphi_G = \frac{\gamma_G}{2}. \quad (11)$$

Угол сдвига фаз между векторами \bar{E}_G и \bar{I}_G :

$$\psi_G = \arctg \left(\frac{\sin \varphi_G}{\cos \varphi_G} + \frac{x_q \bar{I}_G}{U_G \cos \varphi_G} \right), \quad (12)$$

где x_q – синхронное индуктивное сопротивление по оси q .

Угол сдвига фаз (угол нагрузки) между векторами \bar{E}_G и \bar{U}_G :

$$\theta_G = \psi_G - \varphi_G. \quad (13)$$

Токи генератора (внутренние координаты d - q):

$$\bar{I}_d = -\bar{I}_G \sin \psi_G, \quad (14)$$

$$\bar{I}_q = \bar{I}_G \cos \psi_G. \quad (15)$$

Напряжения генератора (внутренние координаты d - q):

$$\bar{U}_d = -K_{d1} \bar{I}_G \cos \psi_G, \quad (16)$$

$$\bar{U}_q = -K_{q1} \bar{I}_G \sin \psi_G + K_{q2} \bar{I}_f, \quad (17)$$

где \bar{I}_f – ток обмотки возбуждения генератора.

Приращение тока возбуждения:

$$\frac{d\bar{I}_f}{dT} = N_f \left(\begin{array}{l} K_{f1} K_{Uq} \bar{U}_q + K_{f2} K_{Id} \bar{I}_d - \\ - K_{f3} K_U (\bar{U}_G - (1 - \Delta\bar{U}_{H1})) - \bar{I}_f \end{array} \right), \quad (18)$$

где

$$\Delta\bar{U}_{H1} = \frac{\bar{I}_{re1} - \bar{I}_{re2}}{k_{re1}} - \quad (19)$$

разность напряжений генераторов;

$$\bar{I}_{re1} = \bar{U}_{q1} \bar{I}_{d1} - \bar{U}_{d1} \bar{I}_{q1} - \quad (20)$$

реактивная составляющая тока СГ;

$$K_{d1} = \frac{\sin \theta_0}{\cos \psi_0}, \quad (21)$$

$$K_{q1} = \frac{1 - \cos \theta_0}{\sin \psi_0}, \quad (22)$$

$$K_{q2} = 1, \quad (23)$$

$$K_{Uq} = \frac{U_{G0}}{U_{f0}}, \quad (24)$$

$$K_{Id} = \frac{I_{G0} x_d}{U_{f0}}, \quad (25)$$

$$K_U = \frac{U_{G0}}{U_{f0}} - \quad (26)$$

безразмерные параметры;

$$N_f = \frac{LU_{f0}}{L_f I_{f0} \nu_0} - \quad (27)$$

критерий динамического подобия; L_f – индуктивность самоиндукции обмотки возбуждения; U_f и I_f – напряжение и ток обмотки возбуждения; K_{ρ_1} , K_{ρ_2} , K_{ρ_3} – коэффициенты усиления по основному сигналу, по возмущающему воздействию и по отклонению регулируемой величины соответственно; k_{re} – коэффициент контура автоматического регулирования системы распределения реактивной нагрузки.

Электромагнитный момент генератора:

$$\bar{M}_G = -K_{G1} \bar{I}_G^2 \sin \psi_G \cos \psi_G + K_{G2} \bar{I}_f \bar{I}_G \cos \psi_G, \quad (28)$$

где

$$K_{G1} = \frac{(L_d - L_q) \bar{I}_{G0}^2}{M_{G0}}, \quad (29)$$

$$K_{G2} = \frac{M_{ad} I_{f0} I_{G0}}{M_{G0}} - \quad (30)$$

безразмерные параметры; L_d и L_q – индуктивности

самоиндукции обмотки якоря по осям d и q ; M_{ad} – индуктивность взаимной индукции по оси d .

Соотношения (9) – (30) получены в [6, 7].

Напряжение на выходе генератора:

$$\overline{U_G} = \sqrt{\left(\overline{U_d^2} + \overline{U_q^2}\right)}. \quad (31)$$

Активная мощность генератора:

$$\overline{P_G} = \overline{U_G I_G} \cos \varphi_G. \quad (32)$$

Преобразователь электроэнергии. Рассматривая преобразователь частоты как безынерционный «квантователь» электроэнергии с идеальными вентилями, не учитывая протекающие в нем электромагнитные процессы, и считаем, что ток на выходе преобразователя непрерывен, а сам преобразователь не выходит за область нормальных нагрузок [14]. Тип преобразователя – частотный с автономным инвертором напряжения (ЧП с АИН).

Зависимость выходного напряжения от входного:

$$\overline{U_M} = \gamma \overline{U_G}, \quad (33)$$

где U_M – напряжение ГЭД.

Гребной электродвигатель. В математической модели [5] приведено математическое описание обобщенного гребного электродвигателя. Как частный случай из него, вытекает математическая модель асинхронного электродвигателя (АД) при частотном управлении. В ее основе лежит точная классическая схема замещения АД, что и определяет необходимые допущения и упрощения. Напряжение на зажимах статора считается синусоидальным, насыщение стали машины не учитывается, распределение потока по дуге воздушного зазора принимается синусоидальным, потери стали в статоре учитываются приближенно, а в роторе – не учитываются [15, 16].

Уравнение движения ГЭД:

$$\frac{d\omega_M}{dT} = N_M (\overline{M_M} - \overline{M_P}), \quad (34)$$

где

$$N_M = \frac{M_{M0} L}{J_M \omega_{M0} v_0} - \quad (35)$$

критерий динамического подобия;

$$\overline{M_M} = K_M I_M \overline{\Phi_M} \cos \varphi_M - \quad (36)$$

момент ГЭД;

$$\overline{I_M} = C_{M24} \gamma \sqrt{\frac{1}{C_{M17} + C_{M18} \alpha^2 + \frac{C_{M21} + C_{M22} \alpha^2}{(C_{M19} \alpha - C_{M20} \omega_M)^2} + \frac{C_{M23} \alpha}{C_{M19} \alpha - C_{M20} \omega_M}}} - \quad (37)$$

ток двигателя;

$$\overline{\Phi_M} = C_{M25} \gamma \sqrt{\frac{x_{2M}^2 (C_{M19} \alpha - C_{M20} \omega_M)^2 + r_{2M}^2}{(b_M^2 + c_M^2 \alpha^2) (C_{M19} \alpha - C_{M20} \omega_M)^2 + (d_M^2 + e_M^2 \alpha^2) r_{2M}^2 + 2 r_{1M} r_{2M}' \alpha (C_{M19} \alpha - C_{M20} \omega_M)}} - \quad (38)$$

магнитный поток ГЭД;

$$\cos \varphi_M = \frac{1}{\sqrt{1 + C_{M26} (C_{M19} \alpha - C_{M20} \omega_M)^2}} - \quad (39)$$

коэффициент мощности двигателя;

$$C_{M17} = \frac{b_M^2}{r_{2M}^2}, \quad (40)$$

$$C_{M18} = \frac{c_M^2}{r_{2M}^2} \alpha_0^2, \quad (41)$$

$$C_{M19} = \alpha_0, \quad (42)$$

$$C_{M20} = \frac{\omega_{M0}}{\omega_{1Mn}}, \quad (43)$$

$$C_{M21} = d_M^2, \quad (44)$$

$$C_{M22} = e_M^2 \alpha_0^2, \quad (45)$$

$$C_{M23} = 2 \frac{r_{1M}}{r_{2M}} \alpha_0, \quad (46)$$

$$C_{M24} = \sqrt{C_{M17} + C_{M18} + \frac{C_{M21}}{\beta_{M0}^2} + \frac{C_{M22}}{\beta_{M0}^2} + \frac{C_{M23}}{\beta_{M0}}}, \quad (47)$$

$$C_{M25} = \sqrt{\frac{(b_M^2 + c_M^2 \alpha_0^2) (C_{M19} \alpha_0 - C_{M20} \omega_{M0})^2 + (d_M^2 + e_M^2 \alpha_0^2) r_{2M}^2 + 2 r_{1M} r_{2M}' \alpha_0 (C_{M19} \alpha_0 - C_{M20} \omega_{M0})}{x_{2M}^2 + \frac{r_{2M}^2}{\beta_{M0}^2}}}, \quad (48)$$

$$C_{M26} = \frac{x_{2M}^2}{r_{2M}^2} - \quad (49)$$

безразмерные параметры;

$$b_M = r_{1M} (1 + \tau_{2M}), \quad (50)$$

$$c_M = x_{0M} \tau_M, \quad (51)$$

$$d_M = \frac{r_{1M}}{x_{0M}}, \quad (52)$$

$$e_M = 1 + \tau_{1M} - \quad (53)$$

постоянные коэффициенты асинхронного частотно-управляемого ГЭД;

$$\tau_{1M} = \frac{x_{1M}}{x_{0M}}, \quad (54)$$

$$\tau_{2M} = \frac{x'_{2M}}{x_{0M}}, \quad (55)$$

$$\tau_M = \tau_{1M} + \tau_{2M} + \tau_{1M} \tau_{2M} - \quad (56)$$

коэффициенты рассеяния; J_M – момент инерции двигателя; K_M – постоянный конструктивный коэффициент; ω_{1Mn} – частота вращения магнитного поля статора; r_{1M} и r'_{2M} – активные сопротивления статора и ротора (приведенное) АД; x_{1M} и x'_{2M} – индуктивные сопротивления статора и ротора (приведенное) АД; x_{0M} – индуктивное сопротивление намагничивания; β_{M0} – абсолютное скольжение ротора АД. Соотношения (34) – (49) получены в [5].

Управление электроэнергетической установкой. Управление осуществляется с поста управления

(ПУ) на мостике. Основная задача – управление движением судна в режиме реального времени. Выходной сигнал ПУ формирует два управляющих воздействия на преобразователь частоты (по частоте α и по напряжению γ).

Относительная частота выходного напряжения преобразователя частоты SE [5]:

$$\alpha = \alpha_{Set} - K_{\alpha P} \alpha_P - K_{\alpha \omega} \alpha_{\omega} - K_{\alpha f} (\alpha_f - \alpha_{f \max}) - K_{\alpha M} (\alpha_M - \alpha_{M \max}) - K_{\alpha I} (\alpha_I - \alpha_{I \max}) - K_{\alpha PD} (\alpha_{PD} - \alpha_{PD \max}) \quad (57)$$

где α_{Set} – задающее значение относительной частоты; α_P – корректирующая связь по мощности ГЭД; α_{ω} – корректирующая связь по угловой скорости вращения ГЭД; α_f – отсечка по выходной частоте преобразователя частоты; α_M – отсечка по вращающему моменту ГЭД; α_I – отсечка по току статора ГЭД; α_{PD} – отсечка по мощности, потребляемой системой электродвижения; $K_{\alpha P}$, $K_{\alpha \omega}$, $K_{\alpha f}$, $K_{\alpha M}$, $K_{\alpha I}$, $K_{\alpha PD}$ – коэффициенты усиления, которые определяются конкретной системой управления.

Относительное напряжение на выходе преобразователя SE [5]:

$$\gamma = \gamma_{Set} - K_{\gamma I} (\gamma_I - \gamma_{I \max}) - K_{\gamma U} \gamma_U \quad (58)$$

где γ_{Set} – задающее значение относительного напряжения преобразователя частоты – сигнал, являющийся функцией относительной частоты и принятого закона управления напряжением; γ_U – корректирующая связь по напряжению ГЭД; γ_I – отсечка по току статора ГЭД; $K_{\gamma I}$, $K_{\gamma U}$ – коэффициенты усиления.

В каждом конкретном случае система автоматического управления имеет свой «набор» управляющих сигналов по каждому каналу регулирования.

Именно эти управляющие воздействия напрямую влияют на показатели качества выполнения судном маневренных операций.

Гребные винты. Гидродинамическую реверсивную характеристику гребного винта, с учетом движения судна по криволинейной траектории, представим в виде параболического полинома [17, 18].

Момент винта:

$$\overline{M_P} = a_{21} \overline{\omega_P}^2 + b_{21} \overline{\omega_P} \overline{v_e} + c_{21} \overline{v_e}^2 + a_M \overline{v}^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_{Bev} \quad (59)$$

где a_{21} , b_{21} , c_{21} – коэффициенты универсальной характеристики винта (постоянны в определенных диапазонах измерения $\overline{\omega_P}$ и $\overline{v_e}$); $\overline{\omega_P}$ – угловая скорость вращения винта; $\overline{v_e}$ – скорость натекания воды на винт; \overline{v} – скорость движения судна; a_M – постоянный коэффициент; α_{Bev} – угол скоса потока воды.

Упор винта:

$$\overline{P_P} = a_{11} \overline{\omega_P}^2 + b_{11} \overline{\omega_P} \overline{v_e} + c_{11} \overline{v_e}^2 + a_P \overline{v}^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_{Bev} \quad (60)$$

где a_{11} , b_{11} , c_{11} – коэффициенты универсальной характеристики винта; a_P – постоянный коэффициент.

Корпус электрохода. Рассматривается движение судна по свободной поверхности воды в связанной с ним системе координат $GXYZ$, начало которой совпадает с центром тяжести судна G . Плоскость GXY параллельна основной плоскости судна, ось GX размещается в диаметральной плоскости и направлена в нос, ось ZY – на

правый борт, ось GZ – вертикально вверх. Присоединенным моментом λ_{26} пренебрегаем [19].

Составляющие скорости движения судна вдоль осей X , Y и скорость вращения вокруг оси Z :

$$\frac{d\overline{v_X}}{dT} = C_{\lambda 2} \overline{v_Y} \overline{\Omega_Z} + N_X \left\{ \sum_J K_{Pj} \overline{P_{ej}} - C_{RX} \overline{\beta_{RP}} \overline{v^2} - \overline{R_X} \right\} \quad (61)$$

$$\frac{d\overline{v_Y}}{dT} = -\frac{1}{C_{\lambda 2}} \overline{v_X} \overline{\Omega_Z} + \frac{N_X}{C_{\lambda 2}} \left\{ \sum_J K_{Pj} \alpha_{jz} \overline{P_{ej}} - C_{RY} \overline{\beta_{RP}} \overline{v^2} - \overline{R_Y} \right\} \quad (62)$$

$$\frac{d\overline{\Omega_Z}}{dT} = -\frac{N_{\Omega}}{N_X} C_{\lambda 21} \overline{v_X} \overline{v_Y} + N_{\Omega} \left\{ \sum_j K_{Pj} h_{Pj} \overline{P_{ej}} + (\overline{M_{PZ}} - \overline{M_{DZ}}) + C_{RY} \overline{X_R} \overline{\beta_{RP}} \overline{v^2} \right\} \quad (63)$$

где

$$\overline{R_X} = \left\{ C_{11} \cos 1,5 \beta_{dr} - C_{12} \sin^4 1,5 \beta_{dr} + C_{13} \left(\frac{2\beta_{dr}}{\pi} \right)^3 \right\} \overline{v^2} \quad (64)$$

продольная сила руля;

$$\overline{R_Y} = \left\{ C_{21} \sin 2\beta_{dr} \cos \beta_{dr} + C_{22} \sin^2 \beta_{dr} + C_{23} \sin^4 2\beta_{dr} \right\} \overline{v^2} \quad (65)$$

поперечная сила руля;

$$\overline{M_{PZ}} - \overline{M_{DZ}} = \left[C_{61} \sin 2\beta_{dr} + C_{62} \sin \beta_{dr} + C_{63} \sin^3 2\beta_{dr} + C_{64} \sin^4 2\beta_{dr} \right] \overline{v^2} - C_{65} \overline{\Omega_Z} \overline{v^2} \quad (66)$$

момент поворота;

$$C_{\lambda 2} = \frac{m + \lambda_{22}}{m + \lambda_{11}} \quad (67)$$

$$C_{\lambda 21} = \frac{2(\lambda_{22} - \lambda_{11})}{m + \lambda_{11}} \quad (68)$$

$$C_{RX} = \frac{\mu_{rx} \frac{\rho}{2} v_0^2 S_C (1 - \psi)^2}{\sum K_{Pj} P_{ej0}} \quad (69)$$

$$C_{RY} = \frac{\mu_K \frac{\rho}{2} v_0^2 S_C (1 - \psi)^2}{\sum K_{Pj} P_{ej0}} \quad (70)$$

$$C_{11} = \frac{R_{X0}}{\sum K_{Pj} P_{ej0}} \quad (71)$$

$$C_{12} = \frac{0,07 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}} \quad (72)$$

$$C_{13} = \frac{c_4 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}, \quad (73)$$

$$C_{21} = \frac{0,5 C_Y^\beta \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}, \quad (74)$$

$$C_{22} = \frac{c_2 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}, \quad (75)$$

$$C_{23} = \frac{c_3 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}, \quad (76)$$

$$C_{61} = \frac{2m_1 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}, \quad (77)$$

$$C_{62} = \frac{2m_2 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}, \quad (78)$$

$$C_{63} = \frac{2m_3 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}, \quad (79)$$

$$C_{64} = \frac{2m_4 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}, \quad (80)$$

$$C_{65} = \frac{2 \left[0,739 + 8,7 \frac{T}{L} \right] C_{m0}^\omega \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}} - \quad (81)$$

безразмерные параметры;

$$N_X = \frac{L \sum K_{Pj} P_{ej0}}{(m + \lambda_{11}) v_0^2}, \quad (82)$$

$$N_\Omega = \frac{L^3 \sum K_{Pj} P_{ej0}}{2(J_Z + \lambda_{66}) v_0^2} - \quad (83)$$

критерии динамического подобия; X_R – расстояние от центра системы координат до руля; P_{ej} и K_{Pj} – полезный упор гребного винта и его доля в суммарном потоке соответственно; L – длина судна; m – масса судна; ρ – удельная плотность воды; λ_{11} и λ_{22} – присоединенные массы воды вдоль осей X и Y ; λ_{66} – присоединенный момент инерции воды; μ_{rx} – коэффициент сопротивления пера руля; μ_K – коэффициент боковой силы руля; ψ – угол курса; S_C – приведенная площадь пера руля; c_4 – коэффициент продольной позиционной силы сопротивления воды; C_Y^β , c_2 , c_3 – коэффициенты силы корпуса; m_1 , m_2 , m_3 , m_4 – коэффициенты позиционного момента сопротивления; F_D – приведенная площадь погруженной части диаметральной плоскости судна; M_{PZ} и M_{DZ} – позиционный и демпфирующий моменты сопротивления; C_{m0}^ω – коэффициент демпфирующего момента сопротивления; β_{dr} – угол дрейфа; J_Z – момент инерции судна при вращении вокруг оси Z .

Угол атаки пера руля:

$$\beta_{RP} = K_R \beta_R - \chi_C \left(\arctg \beta_{dr} - \varepsilon \frac{\Omega_Z}{v} \right), \quad (84)$$

где β_R – угол перекадки пера руля; χ_C – приведенный коэффициент влияния корпуса и винтов на руль; ε – величина, определяемая отношением I_R/L (I_R – расстояние между рулем и мидель шпангоутом). Соотношения (61) – (84) получены в [5].

Разработанная математическая модель позволяет всесторонне анализировать переходные процессы пропульсивных комплексов электроходов на маневрах.

Для анализа маневренных режимов работы разработан пакет прикладных программ. Базовой является программа, позволяющая рассчитывать законы изменения во времени относительных режимных показателей, при выполнении электроходами самых различных маневров. При этом в ходе анализа маневренных режимов:

- рассчитываются безразмерные параметры составных частей комплекса;
- для исследуемого маневра вводятся параметры управления в соответствии с положениями рукояток постов управления и перекадкой пера руля;
- задаются начальные условия;
- согласно выбранным маневрам формируются законы управления каждым силовым контуром;
- рассчитываются текущие значения основных режимных показателей каждого силового контура по ходу выполнения маневра;
- определяются гидродинамические силы и моменты, действующие на судно; рассчитываются текущие значения параметров движения судна в связанной с ним системе координат, а затем – в несвязанной системе координат.

Решения представленной выше системы уравнений (1) – (84) – это решение задачи Коши. В качестве метода решения использован метод Рунге-Кутты-Мерсона.

Окончательные результаты расчетов представляются в числовом виде и в виде готовых графиков изменения во времени режимных показателей:

- а) по каждому силовому контуру:
 - угловой скорости вращения – ω_D , вращающего момента – M_D и мощности теплового двигателя – P_D ;
 - напряжения на выходе – U_G и тока – I_G генератора;
 - тока возбуждения генератора – I_{fG} ;
 - относительного напряжения управления преобразователем – γ ;
 - напряжения – U_M и тока – I_M гребного электродвигателя;
 - вращающего момента – M_M и угловой скорости вращения – ω_M гребного электродвигателя;
- б) по параметрам движения судна:
 - скорости движения – v ;
 - составляющей скорости v вдоль продольной оси X – v_X и вдоль поперечной оси Y – v_Y ;
 - угловой скорости вращения вокруг оси Z – Ω_Z ;
 - угла дрейфа – β_{dr} и угла курса – ψ судна.

При необходимости, могут регистрироваться и любые другие, получаемые в процессе расчетов, режимные показатели.

Для подтверждения адекватности разработанной математической модели и построенного на ее основе

метода расчета, сопоставим результаты математического моделирования с опубликованными в работах [20, 21] данными, полученными в ходе натурных экспериментов другими исследователями.

Воспользуемся приведенными в указанных работах осциллограммами разгона и реверса гребной электроустановки атомного электрохода «Арктика».

Пересчитанные (для удобства сопоставительного анализа) в относительные величины, эти осциллограммы приведены, соответственно, на рис. 2, 3 сплошными линиями. Здесь же штриховыми линиями нанесены текущие значения режимных показателей, полученных при помощи разработанного метода расчета.

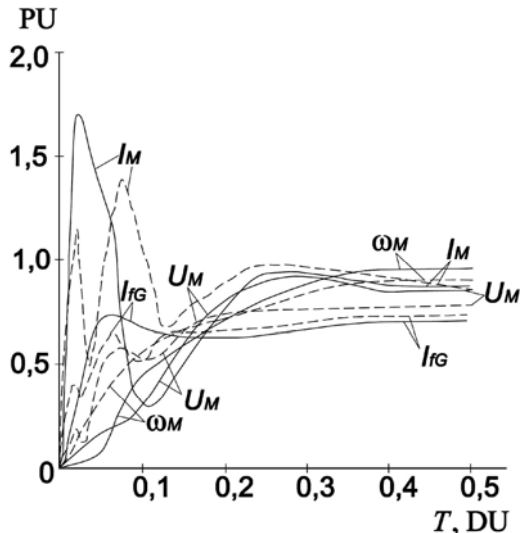


Рис. 2. Сравнение теоретического расчета разгона ГЭУ атомного электрохода «Арктика» с экспериментальными данными

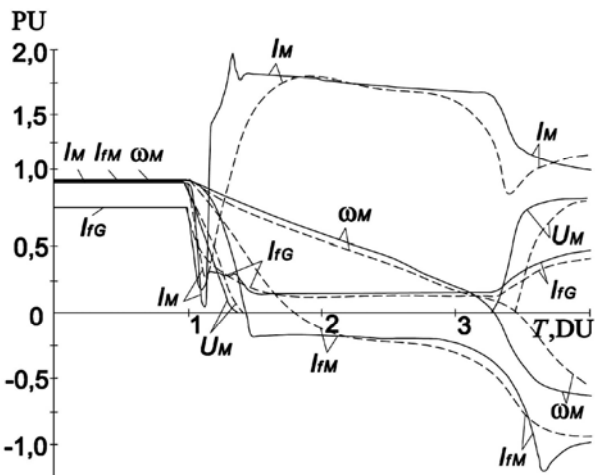


Рис. 3. Сравнение теоретического расчета чередующихся реверсов ГЭУ атомного электрохода «Арктика» с экспериментальными данными

Основные параметры пропульсивного комплекса, необходимые для расчета безразмерных параметров и критериев динамического подобия представлены в табл. 1.

Обобщенные безразмерные параметры и критерии динамического подобия, рассчитанные по приведенным выше соотношениям даны в табл. 2.

Таблица 1

Основные параметры пропульсивного комплекса	
Длина судна по к.в.л.	136 м
Скорость судна	21 узел
<i>Номинальные параметры тепловых двигателей:</i>	
мощность	27 600 кВт
частота вращения	3500 об/мин
<i>Номинальные параметры синхронных генераторов:</i>	
мощность	9000 кВт
напряжение	780 В
частота вращения	3500 об/мин
коэффициент мощности	0,88
обмоточные данные, о.е.:	
x_d	0,96
x_q	1,12
x''_d	0,14
x''_q	0,16
<i>Номинальные параметры гребных электродвигателей:</i>	
мощность	17600 кВт
ток якоря	9200 А
частота вращения	130 об/мин

Таблица 2

Безразмерные параметры и критерии динамического подобия атомохода «Арктика»

K_M	K_{d1}	K_{q1}	K_{q2}	K_{G1}
1,071	1,12	0,294	1	-0,029
K_{G2}	N_D	N_{YG}	N_M	N_X
1,684	0,641	5,6	6,06	0,2
K_{YG}	K_P	K_{Fb}	K_{is}	a_{21}
0,118	900	2	0,5	1,73
a_{11}	b_{21}	b_{11}	c_{21}	c_{11}
1,73	0,33	0,33	-1,06	-1,06

Законы управления каждым силовым контуром заданы в математической модели в соответствии с осциллограммами натурных испытаний [16, 17]:

а) при разгоне $0 \leq T \leq T_1$:

$$\overline{U_{Gset}} = 0,8(1 - e^{-K_1 T}), \quad (85)$$

$$\overline{U_{Mset}} = 1; \quad (86)$$

б) при реверсе с переднего хода на задний $T_1 \leq T \leq T_2$:

$$\overline{U_{Gset}} = 0,8 - 1,5(1 - e^{-0,8K_2(T-T_1)}), \quad (87)$$

$$\overline{U_{Mset}} = 1 - 1,5(1 - e^{-K_2(T-T_1)}) - \quad (88)$$

для $\omega_M > 0$;

$$\overline{U_{Gset}} = 0,1 + 0,5(1 - e^{-1,5K_2(T-T_1)}), \quad (89)$$

$$\overline{U_{Mset}} = -0,5 - 0,5(1 - e^{-K_2(T-T_1)}) - \quad (90)$$

для $\omega_M \leq 0$;

в) при реверсе с заднего хода на передний $T_2 \leq T \leq T_3$:

$$\overline{U_{Gset}} = 0,1 + 0,7(1 - e^{-1,5K_3(T-T_2)}), \quad (91)$$

$$\overline{U_{Mset}} = 0,5 + 0,5(1 - e^{-K_3(T-T_2)}) - \quad (92)$$

для $\omega_M < 0$;

$$\overline{U_{Gset}} = 0,6 - 1,5(1 - e^{-0,8K_3(T-T_2)}), \quad (93)$$

$$\overline{U_{Mset}} = -1 + 1,5(1 - e^{-K_3(T-T_2)}) - \quad (94)$$

для $\omega_M \geq 0$;

где U_{Gset} , U_{Mset} – управляющие сигналы в системах возбуждения СГ и ГЭД соответственно; K_1 , K_2 , K_3 – постоянные времени.

Результаты расчета основных (приведенных на осциллограммах) режимных показателей (I_{fG} , U_M , ω_M , I_M), выполненные по разработанному методу в соответствии с соотношениями (18), (33), (34), (37) в пакете прикладных программ qb64, matlab, показаны штриховыми линиями на рис. 2, 3.

Сравнение результатов расчета по разработанному методу с экспериментальными данными показывает достаточно хорошую сходимость. Тенденции изменения режимных показателей совпадают. Определенные расхождения в начальных стадиях переходных процессов ожидаемы, и объясняются настройками и коэффициентами усиления системы автоматического регулирования, которые для каждого судна имеют свои значения.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают приемлемость предложенной математической модели и разработанного метода для расчета маневренных режимов работы электроходов.

Выводы:

1. Предложена уточненная математическая модель и метод расчета на ее основе режимов работы гребных электроэнергетических установок в составе пропульсивных комплексов электроходов. Метод позволяет рассчитывать текущие значения основных режимных показателей как в установившемся, так и в динамическом режимах электроэнергетических установок, оценивать показатели качества работы электроходов на маневрах.

2. Адекватность разработанного метода расчета подтверждена результатами натурных испытаний, проведенных независимыми исследователями.

3. Использование разработанного метода расчета открывает широкие возможности в исследовании переходных и установившихся режимов работы пропульсивных комплексов судов с электродвижением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васин И.М. Создание перспективных электротехнических и энергетических комплексов судовых единых электроэнергетических систем: дисс. ... докт. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2011. – 445 с.
2. Егоров Л.Е. Компьютерное моделирование единой высоковольтной судовой электроэнергетической системы с пропульсивными комплексами типа азипод в нормальных и аварийных режимах работы: дис. канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2014. – 183 с.
3. Hansen J.F. Modeling and control of marine power system: Thesis for the degree of Philosophy Doctor. – Norwegian University of Science and Technology, 2008. – 119 p.
4. Radan D. Integrated control of marine electrical power system: Thesis for the degree of Philosophy Doctor. – Norwegian University of Science and Technology, 2008. – 231 p.
5. Яровенко В.А. Расчет и оптимизация переходных режимов пропульсивных комплексов электроходов. – Одесса: «Маяк», 1999. – 188 с.
6. Яровенко В.А., Подлях А.Е., Черников П.С. Математическая модель синхронного генератора в составе пропульсивного комплекса электрохода // Вестник ОНМУ. – 2011. – №33. – С. 35-45.

7. Черников П.С. Исследование переходных режимов генераторных агрегатов пропульсивных комплексов электроходов // Проблемы техники. – 2011. – №3. – С. 45-55.

8. Горб С.И. Анализ систем автоматического регулирования частоты вращения судовых дизельных установок: Учеб. пособие. – М.: В/О «Мортехреклама», 1989. – 44 с.

9. Токарев Л.Н. Системы автоматического регулирования. – Санкт-Петербург: «Нотабене», 2001. – 190 с.

10. Чан Вьет Хунг. Исследование переходных процессов в аварийных режимах судовой электроэнергетической системы: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2007.

11. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии. – М.: «Энергия», 1973. – 400 с. с ил.

12. Коноплев К.Г. Импульсное регулирование синхронных генераторов. – Севастополь: СНТУ, 2008.

13. Меркурьев Г.В., Шаргин Ю.М. Устойчивость энергосистем. Санкт-Петербург: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики». – 2005.

14. Кузнецов Н.А., Куропаткин П.В., Хайкин А.Б., Хомяков Н.М. Основы проектирования гребных электрических установок. – Ленинград: Изд-во «Судостроение», 1972. – 656 с.

15. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. – 3-е перераб. изд. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.

16. Хайкин А.Б., Васильев В.Н., Полонский В.И. Автоматизированные гребные электрические установки: Учебник для вузов. – 4-е изд перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1986. – 424 с.

17. Першиц Р.Я. Управляемость и управление судном. – Л.: Судостроение, 1983. – 272 с.

18. Небеснов В.И. Вопросы совместной работы двигателей, винтов, и корпуса судна. – Л.: Судостроение, 1965. – 247 с.

19. Войтковский Я.И., Першиц Р.Я., Титов И.А. Справочник по теории корабля. Изд.2-е перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1973. – 512 с.

20. Гребные электрические установки: Справочник / Е.Б. Айзенштадт, Ю.М. Гилерович, Б.А. Горбунов, В.В. Сержантов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1985. – 304 с.

21. Баранов Л.Н., Малишевский В.Е. Результаты испытаний модернизированных регуляторов ГЭУ атомных ледоколов типа «Арктика»// Энергетические установки и оборудование морских судов. – 1990. – С. 74-78.

REFERENCES

1. Vasin I.M. *Sozdanie perspektivnykh elektrotekhnicheskikh i energeticheskikh kompleksov sudovykh edinykh elektroenergeticheskikh sistem*. Diss. doct. techn. nauk [Creation of perspective electrotechnical and power complexes of ship single electric power systems. Doc. tech. sci. diss.]. St.-Petersburg, 2011. 445 p. (Rus).
2. Egorov L.E. *Komp'yuternoe modelirovanie edinoi vysokovolt'noi sudovoi elektroenergeticheskoi sistemy s propul'sivnymi kompleksami tipa azipod v normal'nykh i aviariynykh rezhimakh raboty*. Diss. kand. tech. nauk [Computer modeling of a single high-voltage ship electric power system with propulsion complexes of the azipod type in normal and emergency operation modes. Cand. tech. sci. diss.]. St. Petersburg, 2014. 183 p. (Rus).
3. Hansen J.F. *Modeling and control of marine power system: Thesis for the degree of Philosophy Doctor*. Norwegian University of Science and Technology, 2008. 119 p.
4. Radan D. *Integrated control of marine electrical power system: Thesis for the degree of Philosophy Doctor*. Norwegian University of Science and Technology, 2008. 231 p.
5. Yarovenko V.A. *Raschet i optimizatsiya perekhodnykh rezhimov propul'sivnykh kompleksov elektrokhodov* [Calculation and optimization of transient regimes of propulsion complexes of electric vessels]. Odessa, Mayak Publ., 1999. 188 p. (Rus).

6. Yarovenko V.A., Podlyakh A.E., Chernikov P.S. The mathematical model of a synchronous generator in the composition of a propulsion complex of an electric vessel. *Bulletin of the ONMU*, 2011, vol. 33, pp. 35-45. (Rus).
7. Chernikov P.S. Investigation of transient regimes of generator aggregates of propulsion complexes of electric vessels. *Problems of technology: Scientific and production magazine*, 2011, no.3, pp. 45-55. (Rus).
8. Gorb S.I. *Analiz sistem avtomaticheskogo regulirovaniia chastoty vrashcheniia sudovykh dizel'nykh ustanovok* [Analysis of automatic control systems for the speed of ship diesel engines]. Moscow, Morteckhrekhlama Publ., 1989. 44 p. (Rus).
9. Tokarev L.N. *Sistemy avtomaticheskogo regulirovaniia* [Automatic control systems]. St. Petersburg, Notabene Publ., 2001. 190 p. (Rus).
10. Chan Viet Hung. *Issledovanie perekhodnykh protsessov v avariinykh rezhimakh sudovoi elektroenergeticheskoi sistemy*. Diss. kand. tech. nauk [Investigation of transient processes in the emergency modes of the ship electric power system. Cand. tech. sci. diss.]. St. Petersburg, 2007. (Rus).
11. Kopylov I.P. *Elektromekhanicheskie preobrazovateli energii* [Electromechanical energy converters]. Moscow, Energy Publ., 1973. 400 p. (Rus).
12. Konoplev K. G. *Impul'snoe regulirovanie sinkhronnykh generatorov* [Impulse regulation of synchronous generators]. Sevastopol, SevNTU Publ., 2008. (Rus).
13. Merkuriev G.V., Shargin Yu.M. *Ustoichivost' energosistem* [Stability of power systems]. St. Petersburg, NOU Center for the Training of Energy Personnel Publ., 2005. (Rus).
14. Kuznetsov N.A., Kuropatkin P.V., Khaikin A.B., Khomyakov N.M. *Osnovy proektirovaniia grebnykh elektricheskikh ustanovok* [Basic design of rowing electrical installations]. Leningrad, Shipbuilding Publ., 1972. 656 p. (Rus).
15. Bulgakov A.A. *Chastotnoe upravlenie asinkhronnymi dvigateliami* [Frequency Control of Asynchronous Motors]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 216 p. (Rus).
16. Khaikin A.B., Vasilyev V.N., Polonsky V.I. *Avtomatizirovannye grebnye elektricheskie ustanovki* [Automated rowing electrical installations]. Moscow, Transport Publ., 1986. 424 p. (Rus).
17. Pershitz R.Ya. *Upravliaemost' i upravlenie sudnom* [Controllability and control of the ship]. Leningrad, Shipbuilding Publ., 1983. 272 p. (Rus).
18. Nebesnov V.I. *Voprosy sovместnoi raboty dvigatelei, vintov, i korpusa sudna* [Questions of the joint operation of engines, propellers, and hull of the vessel]. Leningrad, Shipbuilding Publ., 1965. 247 p. (Rus).
19. Voytkunsky Ya.I., Pershitz R.Ya., Titov I.A. *Spravochnik po teorii korablia* [Handbook of ship theory]. Leningrad, Shipbuilding Publ., 1973. 512 p. (Rus).
20. Aizenshtadt E.B., Gilerovich Yu.M., Gorbunov B.A., Serzhantov V.V. *Grebnye elektricheskie ustanovki. Spravochnik* [Rowing electrical installations. Reference book]. Leningrad, Shipbuilding Publ., 1985. 304 p. (Rus).
21. Baranov L.N., Malishevsky V.E. Results of tests of modernized regulators of power plants of nuclear icebreakers of the «Arktika» type. *Power installations and equipment of sea-going vessels*, 1990, pp. 74-78. (Rus).

Поступила (received) 20.09.2017

Яровенко Владимир Алексеевич¹, д.т.н., проф.,
 Черников Павел Сергеевич¹, ст. преподаватель,
¹ Одесский национальный морской университет,
 65007, Одесса, ул. Мечникова, 34,
 тел/phone +380 50 5980683,
 e-mail: yarovenko@3g.ua; chernikov@onmu.odessa.ua

V.A. Yarovenko¹, P.S. Chernikov¹

¹ Odessa National Maritime University,
 34, Mechnikova Str., Odessa, 65007, Ukraine.

A calculation method of transient modes of electric ships' propelling electric plants.

The purpose of the work is to develop the method for calculating the transient modes of electric ships' propelling electric plants during maneuver. This will allow us to evaluate and improve the maneuverability of vessels with electric motion. **Methodology.** The solution to the problems is proposed to be carried out on the basis of mathematical modeling of maneuvering modes. The duration of transient modes in an electric power plant at electric ships' maneuvers is commensurable with the transient operation modes of the vessel itself. Therefore, the analysis of the electric power plants' maneuvering modes should be made in unity with all the components of the ship's propulsion complex. **Results.** A specified mathematical model of transient regimes of electric ship's propulsion complex, including thermal motors, synchronous generators, electric power converters, propulsion motors, propellers, rudder, ship's hull is developed. The model is universal. It covers the vast majority of modern and promising electric ships with a traditional type of propulsors. It allows calculating the current values of the basic mode indicators and assessing the quality indicators of maneuvering. The model is made in relative units. Dimensionless parameters of the complex are obtained. These parameters influence the main indicators of the quality of maneuvering. The adequacy of the suggested specified mathematical model and the developed computation method based on it were confirmed. To do this, the results of mathematical modeling for a real electric ship were compared with the data obtained in the course of field experiments conducted by other researchers. **Originality.** The mathematical description of a generator unit, as an integral part of an indivisible ship's propulsion complex, makes it possible to calculate the dynamic operation modes of electric power sources during electric vessels' maneuvering. There is an opportunity to design the electric ships' propulsion power plant according to the final result – according to the indicators characterizing the vessel and its maneuvering properties. The use of a system of dimensionless units provides a generality to the results obtained. Electric ships with equal values of dimensionless parameters will have correspondingly the same values (in relative units) of maneuvering quality indicators. **Practical value.** The developed mathematical model and the research method constructed on its basis allow calculating the current values of the basic regime parameters of all the components of the ship's propulsion complex. A mathematical apparatus for estimating the main indicators of the quality of electric ships' maneuvering is proposed. There is an opportunity to improve the electric ships' maneuvering characteristics by optimizing the operation of propulsion motors. References 21, tables 2, figures 3.

Key words: electric ship's propelling electric plant, mathematical model of transient modes, calculation method.