

П. С. ЧЕРНИКОВ, В. А. ЯРОВЕНКО, Е.И. ЗАРИЦКАЯ

ВЛИЯНИЕ ОБЩЕСУДОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРЕБНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

Розглядаються електроходи з єдиною судовою електроенергетичною системою. Запропоновано спосіб формування законів управління гребними електричними установками (ГЕУ) на маневрах. Оптимізація параметрів законів управління здійснюється за показниками маневреності судна. Проаналізовано вплив законів управління ГЕУ на показники якості електроенергії суднової мережі і вплив переходу до оптимального управління ГЕУ на показники якості електроенергії. Оптимізацію законів управління можна здійснювати без урахування загальносудових споживачів. Зміна навантаження загальносудових споживачів впливає на значення цільової функції, але не впливає на оптимальні параметри законів управління. Погіршення показників якості електроенергії знаходиться у припустимих межах.

Ключові слова: гребні електричні установки, оптимальне управління, взаємний вплив оптимального управління і показників якості електроенергії.

Рассматриваются электроходы с единой судовой электроэнергетической системой. Предложен способ формирования законов управления гребными электрическими установками (ГЭУ) на маневрах. Оптимизация параметров законов управления проводится по показателям маневренности судна. Проанализировано влияние законов управления ГЭУ на показатели качества электроэнергии судовой сети и влияние перехода к оптимальному управлению ГЭУ на показатели качества электроэнергии. Оптимизацию законов управления можно осуществлять без учета общесудовых потребителей. Изменение нагрузки общесудовых потребителей оказывает влияние на значение целевой функции, но не влияет на оптимальные параметры законов управления. Ухудшение качества электроэнергии находится в допустимых границах.

Ключевые слова: гребные электрические установки, оптимальное управление, взаимное влияние оптимального управления и показателей качества электроэнергии.

The urgency of the problem. The most important condition for ensuring the safety of navigation and reducing accidents in the fleet is to take into account the maneuverability of ships, and especially their inertial characteristics. Electric propulsion vessels have the best maneuverability. Special attention is paid to the issues of control of electrical propulsion plants (EPP) of electric ships during maneuvers. Recently, more and more electric ships with a unified electric power system (UEPS) are being built. Both electrical propulsion plant and electricity consumers of electric ships with the UEPS are supplied with power from the general tires of the ship power plant and have a mutual influence on each other. This effect should be taken into account when optimizing the control of the electrical propulsion plant. **The status of the issue.** Quality indicators of electric ships' maneuvering were determined and quality indicators of electric energy of the ship network were selected. A method of optimizing the parameters of the control laws of EPP has been developed. The transition to optimal control leads to an increase in the load on the propulsion motors and on the generating units. This may affect the quality indicators of the electric energy of the ship network. The study of this influence is the **purpose of this work**. **The method of solving the problem.** A mathematical model of EPP transient modes as part of the ship propulsion complex is used to evaluate the maneuvering characteristics of electric ships. A method of calculating transient modes of operation during maneuvering has been developed on its basis. It is proposed to form the control signals for frequency and voltage in the form of polynomials. A method of optimizing the parameters of control laws has been developed. **The results of the study.** Effects of load changes on optimal control laws are the following: load decrease slightly affects the optimal solution; with an abrupt increase in the load the stopping distance grows. The optimal parameters of the control laws vary slightly. The impact of the transition from the classical to the optimal control is the following: the quality indicators of the electric energy of the ship network are deteriorating, but are within acceptable limits. **Conclusions.** The search for optimal control laws of EPP during maneuvering for electric ships with a unified electric power system can be carried out without taking into account the switching on and off of ship consumers. The change of load in the ship network affects the value of the target function but does not affect the optimal parameters of the control laws.

Keywords: electrical propulsion plants, optimal control, mutual influence of optimal control and quality indicators of electric energy.

Актуальность исследования. Одна из проблем, которая остро стоит перед морским транспортом – повышение безопасности мореплавания. Ежегодно потери мирового флота в результате аварий составляют порядка 500 судов в год. По различным источникам из общего числа аварий 40–45 % сопровождаются столкновением. Количество же аварийных ситуаций с незначительными повреждениями корпусов, связанных с навалами на причалы, другие сооружения, столкновениями при маневрировании в порту и узостях без человеческих жертв, вообще не поддаются учету. Важнейшим условием обеспечения безопасности плавания и снижения аварийности на флоте является глубокое знание и учет судоводителями маневренных качеств судов и особенно – их инерционных характеристик. Именно высокие маневренные свойства (а это – неоспоримое преимущество электродвижения перед традиционным типом привода судовых движителей) в первую очередь способствуют безопасности выполнения судами маневренных операций. Неудивительно при этом, что вопросам управ-

ления гребными электрическими установками (ГЭУ) электроходов на маневрах уделяется особое внимание.

В теории и практике электродвижения все больше внимания уделяется электроходам с единой электроэнергетической системой (ЕЭЭС). Такая установка, обеспечивая питанием и гребную электрическую установку, и общесудовые потребители электроэнергии, имеет существенные преимущества перед автономными системами электродвижения. В наибольшей степени эти преимущества проявляются на судах, у которых есть мощные потребители, работающие раздельно во времени от системы электродвижения. Применение единой электроэнергетической системы позволяет сократить количество генераторных агрегатов, уменьшить массогабаритные характеристики источников электроэнергии, снизить расход топлива и вредных выбросов в окружающую среду, улучшить компоновку энергетического оборудования, повысить надежность судовой электроэнергетической установки.

© П. С. Черников, В. А. Яровенко, Е.И. Зарицкая, 2019

Так как в электроходах с ЕЭЭС и гребная электрическая установка, и общесудовые потребители электроэнергии получают питание от общих шин судовой электростанции, обе эти составные части оказывают взаимное влияние друг на друга. Поэтому, при поиске оптимального управления ГЭУ следует оценивать влияние протекающих в ней процессов на параметры электроэнергии судовой сети. В свою очередь, включение и отключение мощных потребителей также может влиять на организацию управления ГЭУ, поэтому при оптимизации управления это влияние следует учитывать.

Состояние рассматриваемого вопроса. Для расчета маневренных режимов работы и оценки маневренных характеристик электроходов в [1] разработана математическая модель. В ней представлено математическое описание переходных процессов в ГЭУ, как составной части единого судового пропульсивного комплекса. В состав комплекса входят генераторные агрегаты судовой электростанции (тепловые двигатели и синхронные генераторы), преобразователи электроэнергии, гребные электродвигатели (асинхронные частотно-управляемые), система автоматического регулирования, гребные винты, руль и корпус электрохода.

Математическая модель составлена в относительных единицах. Выявлены безразмерные параметры пропульсивных комплексов – параметры системы «тепловые двигатели – гребная электрическая установка – движители – корпус судна». Именно эти параметры влияют на текущие значения режимных показателей составных частей комплекса, на показатели качества маневрирования и показатели качества электроэнергии судовой сети на маневренных режимах.

Разработан метод расчета переходных процессов ГЭУ в составе пропульсивного комплекса при маневрировании. По результатам многочисленных расчетов переходных режимов при различных маневрах [2–4], исходя из практики проектирования и эксплуатации электроходов [5, 6], руководствуясь рекомендациями [7] по оценке качества электроэнергии судовой сети предложены показатели для количественной оценки работы всех составных частей комплекса на маневрах. Для оценки качества электроэнергии судовой сети выбраны показатели, характеризующие (согласно стандарту ISO 8528-5) динамические параметры напряжения и частоты на выходе генераторов.

Переход к оптимальному (по показателям маневренности судна) управлению неизбежно приведет к более напряженному режиму работы гребных электродвигателей, увеличению нагрузок на генераторные агрегаты и может сказаться на показателях качества электроэнергии судовой сети. Исследование влияния перехода к оптимальному управлению на показатели качества электроэнергии и исследование влияния резкого изменения нагрузки судовой сети (включение или отключение мощных общесудовых потребителей) на организацию управления гребной электрической установкой и является целью настоящей работы.

Метод решения задачи. На базе математической модели [1] разработан пакет прикладных программ для расчета переходных режимов пропульсивных

комплексов при маневрировании. Базовой является программа, позволяющая рассчитывать текущие значения режимных показателей по ходу выполнения маневра.

В состав электроэнергетической установки электрохода, как правило, входят два-три силовых контура (по количеству гребных электродвигателей – ГЭД). Управление каждым контуром осуществляется независимо с поста управления. При этом выходное напряжение преобразователя частоты регулируется по двум параметрам: по относительной частоте α (сигнал, задающий частоту вращения ГЭД) и по относительному напряжению γ .

Применительно к гребным частотно-регулируемым электродвигателям традиционно предлагается пропорциональный закон управления $\frac{\gamma}{\alpha} = \text{const}$. Здесь γ – относительное напряжение,

$$\gamma = \frac{U}{U_n}, \quad \alpha = \frac{f}{f_n}$$

закон управления получен применительно к «электрическим» показателям работы электродвигателей. При системном подходе показатели электродвигателей отходят на второй план. Возникает необходимость в поисках таких законов управления, которые обеспечат наилучшие значения показателей качества маневрирования электрохода, с контролируемыми при этом (с заданными допусками) показателями работы гребной электроэнергетической установки и контролируемыми параметрами электроэнергии судовой сети.

Предложено в [4] формировать управляющие сигналы по относительной частоте $\alpha = \alpha(T)$ и по относительному напряжению $\gamma = \gamma(\alpha)$ в виде:

$$\alpha = \alpha_{prim} + k_1(1 - \exp(-k_5 T)); \quad (1)$$

$$\gamma = k_2\alpha + k_3\alpha^2 + k_4\alpha^3 + (1 - k_2 - k_3 - k_4)\alpha^4, \quad (2)$$

где α_{prim} – начальное значение относительной частоты питающего ГЭД напряжения; $T = \frac{v_0 t}{L}$ – безразмерное время; v_0 – скорость движения судна в установившемся режиме; L – длина судна; t – текущее время; k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 – оптимизируемые параметры.

В качестве критерия оптимальности выбран минимум тормозного пути электрохода при реверсе гребного электродвигателя L_{Tmin} .

Величина тормозного пути отыскивается в результате полного расчета маневра. Расчет осуществляется по программе, позволяющей вычислять текущие значения режимных показателей, показатели качества выполнения маневра судном, динамические показатели гребной электроэнергетической установки и показатели качества электроэнергии судовой сети. Основными показателями выбраны:

- максимальные приращения мощности тепловых двигателей и отклонения угловой скорости их вращения;
- броски тока генераторов при разгоне и при реверсе;

– броски вращающего момента ГЭД при разгоне и при реверсе;
 – броски тока ГЭД при разгоне и при реверсе;
 – максимальная скорость судна к концу маневра;
 – продолжительность выполнения маневра;
 – пройденный судном путь по окончанию маневра;

– затраты энергии на выполнение маневра.

Показатели, характеризующие (согласно [7]) динамические параметры напряжения и частоты на выходе генераторов (судовой сети):

– относительное отклонение частоты на выходе генераторов при увеличении нагрузки

$$\delta f_{dyn}^- = [(f_{dyn \min} - f_{Gstd}) / f_{Gstd}] 100\%, \quad (3)$$

и при снижении нагрузки

$$\delta f_{dyn}^+ = [(f_{dyn \max} - f_{Gstd}) / f_{Gstd}] 100\%; \quad (4)$$

– относительное отклонение напряжения на выходе генераторов при увеличении нагрузки

$$\delta U_{dyn}^- = [(U_{dyn \min} - U_{Gstd}) / U_{Gstd}] 100\%, \quad (5)$$

и при снижении нагрузки

$$\delta U_{dyn}^+ = [(U_{dyn \max} - U_{Gstd}) / U_{Gstd}] 100\%; \quad (6)$$

– продолжительность восстановления частоты на выходе генераторов при повышении – t_{fin} и при снижении – t_{de} мощности;

– продолжительность восстановления частоты на выходе генераторов при повышении – $t_{u \text{ in}}$ и при снижении – $t_{u \text{ de}}$ мощности.

Эти показатели характеризуют качество электроэнергии судовой сети.

В соответствии с задачей и целью исследования, критерием оптимальности выбран минимум тормозного пути L_{Tmin} . Оптимизация управляющих сигналов (1)–(2) осуществляется по темпу изменения относительной частоты (в зависимости от переключки рукоятки ПУ) и по относительному напряжению $\gamma = \gamma(\alpha)$. Величина тормозного пути определяется по окончанию маневра, а численные значения показателей качества электроэнергии судовой сети оцениваются текущими (по ходу маневра) значениями соответствующих режимных показателей.

Решаемые задачи относятся к области нелинейного программирования. Необходимо минимизировать целевую функцию

$$L_T(\mathbf{k}) \rightarrow \min, \mathbf{k} \in E^n, \quad (7)$$

где $\mathbf{k} = [k_1, k_2, k_3, k_4, k_5]$ – параметры сигналов управления, которые оптимизируются; E^n – допустимая область n -мерного пространства.

Линейные ограничения p в виде неравенств

$$g_j(\mathbf{k}) \geq 0, j = 1, 2, \dots, p \quad (8)$$

определяются допусками по диапазонам изменения значений режимных показателей электроэнергетической установки.

Оптимальным решением будет пара \mathbf{k}^* и $L_T(\mathbf{k}^*)$, состоящая из оптимальной точки

$$\mathbf{k}^* = [k_1^*, k_2^*, k_3^*, k_4^*, k_5^*] \quad (9)$$

и соответствующего ей значения целевой функции $L_T(\mathbf{k}^*)$.

В работе [2] описан метод оптимизации, разработанный для решения такого класса задач. Он учитывает сложный характер целевых функций и обеспечивает, как показали результаты расчетов, достижение поставленных целей с минимальным количеством вычислительных операций.

Анализ переходных режимов работы затруднен тем, что число параметров, влияющих на поведение комплекса, велико, а объем информации, необходимой для их расчета, ограничен. Переход к системе относительных единиц и выявление обобщенных безразмерных параметров позволили сократить их количество, но все равно оно остается слишком большим. Известно, что значимое влияние на показатели качества работы сложных электромеханических систем оказывает лишь небольшое число параметров. В соответствии с этим, по каждому показателю качества были выявлены [3] значимые параметры и оценены их вклады в соответствующие показатели. Такими значимыми обобщенными параметрами для маневра «реверс» оказались [4]:

– энерговооруженность электрохода

$$N_X = \frac{L \sum K_{Pj} P_{ej0}}{(m + \lambda_{11}) v_0^2}, \quad (10)$$

– безразмерные параметры частотно-управляемых ГЭД

$$C_{M18} = \frac{c_M^2}{r_{2M}^2} \alpha_0^2; \quad (11)$$

$$C_{M20} = \frac{\omega_{M0}}{\omega_{1Mn}}, \quad (12)$$

где P_{ej} и K_{Pj} – полезный упор j -го гребного винта и его доля в суммарном упоре; m – масса судна; λ_{11} – присоединенные к судну массы воды вдоль его продольной оси; ω_M – угловая скорость вращения вала ГЭД; ω_{1Mn} – угловая частота вращения магнитного поля статора ГЭД; r'_{2M} – приведенное активное сопротивление ротора ГЭД; $c_M = x_{0M} \tau_M$ – постоянный конструктивный коэффициент частотно-управляемого асинхронного ГЭД.

Остальные параметры можно принимать неварьруемыми.

Результаты исследований.

Целью работы является оценка степени влияния перехода к оптимальному управлению на показатели качества электроэнергии и влияния резкого изменения нагрузки судовой сети на управление гребной установкой. Действительно, при маневрировании электроходов возможны внезапные «сбросы» или «набросы» нагрузки у общесудовых потребителей электроэнергии. Это может влиять на найденные оптимальные решения по управлению ГЭУ. С другой

стороны, переход к оптимальному управлению увеличивает нагрузку на гребные электродвигатели и соответственно на генераторные агрегаты. Это может привести к таким отклонениям показателей качества электроэнергии, которые превысят требования международных стандартов. В соответствии с этим, рассмотрено влияние изменения нагрузки судовой сети на оптимальное управление гребными электрическими установками, и влияние оптимального управления на показатели качества электроэнергии судовой сети при маневрировании.

На первом этапе анализа необходимо оценить у современных электроходов долю мощности ГЭД (их называют пропульсивными двигателями – ПД) в общей мощности источников электроэнергии (СГ). Такие соотношения для некоторых электроходов с ЕЭЭС представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Соотношение мощностей ПД и СГ

Тип, название электрохода	Суммарная мощность ПД, МВт	Суммарная мощность СГ, МВт
Ледокол «Арктика», проект 22220	60	72
Ледокол «Таймыр»	36	45
Ледокол «Отсо»	15	30
Спасательный «Берингов пролив»	7	11,5
Сейсмический «Sanco star»	5	6,6
Гидрографич. «Вайгач»	1,1	2

Из таблицы 1 следует, что доля мощности пропульсивных электродвигателей в суммарной мощности потребителей электроэнергии судовой электростанции колеблется в пределах 50–83 %. Это соотношение справедливо и для токов.

Для анализа взаимного влияния системы электродвижения и общесудовых потребителей (питающихся от общих шин электростанции) имеет смысл представить параллельно работающие источники электроэнергии одним «эквивалентным» генераторным агрегатом (рис. 1).

Суммарный ток такого генератора

$$I_{Geq} = K_{IM}(I_{M1} + I_{M2}) + K_{Isc}\Sigma I_{SC} = K_{IM}\Sigma I_M + K_{Isc}\Sigma I_{SC}, \quad (13)$$

где K_{IM} – коэффициент, определяющий долю тока системы электродвижения в суммарном токе «эквивалентного» генератора; I_{M1} – ток ГЭД правого контура; I_{M2} – ток ГЭД левого контура; K_{Isc} – коэффициент, определяющий долю суммарного тока судовых потребителей; ΣI_{SC} – суммарный ток судовых потребителей.

Благодаря такому упрощению структурной схемы, после внесения соответствующих корректировок в математическую модель переходных режимов, можно проанализировать влияние изменения нагрузки на оптимальное управление ГЭУ и наоборот – влияние оптимального управления на показатели качества электроэнергии судовой сети.

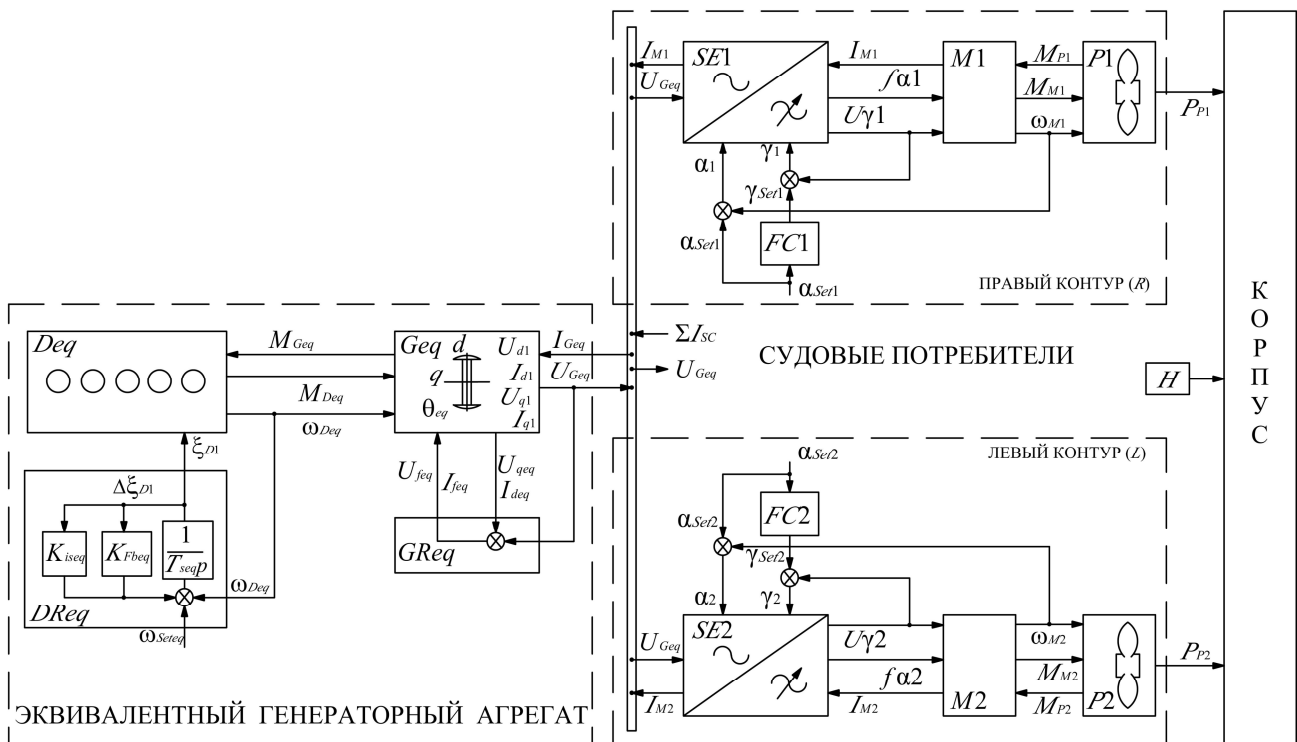


Рис. 1 – Структурная схема пропульсивного комплекса электрохода с единой электроэнергетической системой при работе ГЭУ и судовой сети от «эквивалентного» ГА

На первом этапе проведен анализ влияния изменения нагрузки общесудовых потребителей на оптимальные параметры управляющих сигналов управления. Рассматривался маневр «реверс» электрохода на прямолинейной траектории до полной его остановки ($v = 0$). Численные значения значимо влияющих параметров N_X , C_{M18} , C_{M20} соответствовали средним (из возможных диапазонов изменений) значениям: $N_X = 0,165$; $C_{M18} = 43,9$; $C_{M20} = 0,925$.

В процессе поиска оптимальных параметров $\mathbf{k}^* = [k_1^*, k_2^*, k_3^*, k_4^*, k_5^*]$ управляющих сигналов (1)–(2), в момент перехода ГЭД в частотно-управляемый этап реверса скачкообразно изменялась нагрузка общесудовых потребителей – производился ее «сброс» или «наброс».

Оптимальные решения при сбросе нагрузки представлены в табл. 2. Графические варианты оптимальных решений – зависимости $\alpha = \alpha(T)$, $\gamma = \gamma(T)$ и $\gamma = \gamma(\alpha)$ – представлены на рис. 2.

Таблица 2 – Оптимальные решения по критерию минимума тормозного пути L_{Tmin} ($v_{prim} = 0,5$) при сбросе нагрузки

Варианты соотношения мощностей	Доля токов в I_{Geq}		Оптимальные решения						Степень ухудшения L_{Tmin} , %
	ΣI_M	ΣI_{SC}	уравнения $\alpha = \alpha(T)$		уравнения $\gamma = \gamma(\alpha)$			L_{Tmin} , о.е.	
			K_1	K_5	K_2	K_3	K_4		
1	0,5	0,5	0,637	6,94	1,28	0,026	1,03	0,832	0,6
	0,5	0,25*	0,637	6,94	1,3	-0,126	1,03	0,837	
2	0,6	0,4	0,665	5,2	1,334	0,215	0,76	0,849	0,3
	0,6	0,2*	0,663	5,13	1,337	0,213	0,755	0,852	

* – произведен сброс нагрузки во время реверса

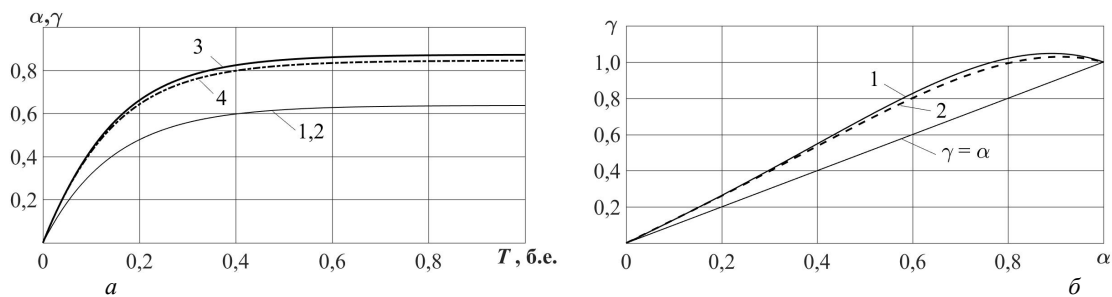


Рис. 2 – Оптимальные решения по критерию L_{Tmin} при сбросе нагрузки в судовой сети.

На рис. 2 приведены оптимальные решения для первого варианта (из табл. 2) соотношения мощностей. На рис. 2, а показаны $\alpha = \alpha(T)$ и $\gamma = \gamma(T)$: кривые 1, 2 – зависимости $\alpha = \alpha(T)$ до и после сброса соответственно; кривые 3, 4 – зависимости $\gamma = \gamma(T)$ до и после сброса нагрузки. На рис. 2, б – приведены $\gamma = \gamma(\alpha)$: кривые 1, 2 – зависимости $\gamma = \gamma(\alpha)$ до и после сброса; кривая $\gamma = \alpha$ – вариант с классическим (традиционно рекомендуемым) пропорциональным управлением.

Анализ результатов решений показывает, что сброс нагрузки незначительно влияет на оптимальное решение. И оптимальные (по минимуму тормозного пути) параметры управляющих сигналов и величина тормозного пути изменяются незначительно.

Оптимальные решения при набросе нагрузки представлены в табл. 3. Графические варианты оптимальных решений – зависимости $\alpha = \alpha(T)$, $\gamma = \gamma(T)$ и $\gamma = \gamma(\alpha)$ – представлены на рис. 3.

Таблица 3 – Оптимальные решения по критерию минимума L_{Tmin} ($v_{prim} = 0,5$) при набросе нагрузки судовой сети

Варианты соотношения мощностей	Доля токов в I_{Geq}		Оптимальные решения						Степень ухудшения L_{Tmin} , %
	ΣI_M	ΣI_{SC}	уравнения $\alpha = \alpha(T)$		уравнения $\gamma = \gamma(\alpha)$			L_{Tmin} , в.о.	
			K_1	K_5	K_2	K_3	K_4		
1	0,5	0,25	0,634	4,18	1,37	0,18	0,654	0,425	26,8
	0,5	0,5*	0,64	4,57	1,36	-0,04	1,52	0,539	
2	0,6	0,2	0,66	5,07	1,436	0,087	0,742	0,513	10
	0,6	0,4*	0,65	4,53	1,35	0,2	0,687	0,566	

* – произведен наброс нагрузки во время реверса

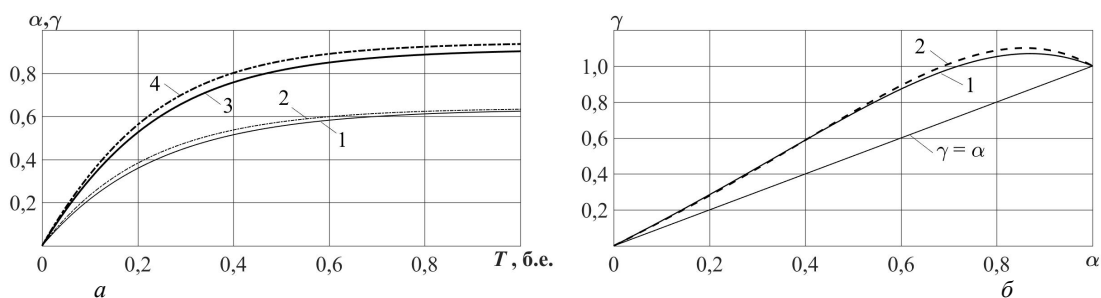


Рис. 3 – Оптимальные решения по критерию L_{Tmin} при набросе нагрузки в судовой сети;

На рис. 3 приведены оптимальные решения для первого варианта (из табл. 3) соотношения мощностей. На рис. 3, *a* показаны $\alpha = \alpha(T)$ и $\gamma = \gamma(T)$: кривые 1, 2 – зависимости $\alpha = \alpha(T)$ до и после наброса нагрузки; кривые 3, 4 – зависимости $\gamma = \gamma(T)$ до и после наброса. На рис. 3, *б* – приведены $\gamma = \gamma(\alpha)$: кривые 1, 2 – зависимости $\gamma = \gamma(\alpha)$ до и после наброса; кривая $\gamma = \alpha$ – вариант с пропорциональным управлением.

Анализ результатов, приведенных в табл. 3 и на рис. 3, показывает следующее. При набросе нагрузки значение тормозного пути возрастает от 10 % до 26 %. Степень ухудшения значения целевой функции зависит от соотношения суммарных мощностей гребных электродвигателей и общесудовых потребителей электроэнергии. Например, для электрохода с длиной судна в 130 м, с соотношением $\sum I_M = 0,5 I_{Geq}$, при реверсе с начальной скоростью $v_{prim} = 0,5$, при оптимальных параметрах сигналов управления и резком набросе нагрузки в 25 % (от суммарной мощности источников электроэнергии), тормозной путь L_{Tmin} увеличится с 55 м до 70 м. В то же время, оптимальные параметры сигналов управления $k^* = [k_1^*, k_2^*, k_3^*, k_4^*, k_5^*]$ изменяются незначительно.

Таким образом, при поисках оптимальных законов управления ГЭУ на маневрах можно не учитывать сбросы и набросы нагрузки общесудовых потребителей электроэнергии. Законы управления при этом практически не изменяются и их можно закладывать в систему автоматического управления. Изменяются

только значения целевой функции: в рассматриваемом случае – длина тормозного пути. Это ожидаемо и это следует учитывать.

На втором этапе был проведен анализ влияния перехода от пропорционального к оптимальному управлению на показатели качества электроэнергии судовой сети. Переход к оптимальному управлению приводит к увеличению нагрузок на гребные электродвигатели. Соответствующим образом растут нагрузки на источники электроэнергии и увеличивается вероятность ухудшения показателей качества электроэнергии судовой сети. Для выявления степени ухудшения были выполнены расчеты маневров и оценены показатели качества электроэнергии при пропорциональном $\gamma / \alpha = \text{const}$ управлении. Затем, были проведены оптимизационные расчеты, найдены оптимальные параметры управляющих сигналов и рассчитаны те же маневры, но уже при оптимальном управлении гребной электрической установкой. В результате получены численные значения показателей качества электроэнергии и при таком управлении. Результаты расчетов выполненных при пропорциональном и оптимальном управлении, представлены в таблице 4. Здесь же приведены требования ДСТУ относительно показателей, характеризующих качество электроэнергии судовой сети на переходных режимах.

Таблица 4 – Влияние пропорционального и оптимального управления на показатели качества электроэнергии судовой сети

Параметр	Требования ДСТУ	Управление	
		пропорциональное	оптимальное
относительное отклонение частоты на выходе генераторов при повышении нагрузки δf_{dyn}^- , %	≤ -7	-4,9	-6,2
относительное отклонение частоты на выходе генераторов при снижении нагрузки δf_{dyn}^+ , %	≤ 10	1,8	1,93
время восстановления частоты на выходе генераторов при повышении мощности $t_{f in}$, с	≤ 3	0,55	1,08
время восстановления частоты на выходе генераторов при снижении мощности $t_{f de}$, с	≤ 3	2,03	2,41
относительное отклонение напряжения на выходе генераторов при повышении нагрузки δU_{dyn}^- , %	≤ -15	-1,34	-2,8
относительное отклонение напряжения на выходе генераторов при снижении нагрузки δU_{dyn}^+ , %	≤ 20	1,12	2,07
время восстановления напряжения на выходе генераторов при повышении мощности $t_{u in}$, с	≤ 4	1,1	1,16
время восстановления напряжения на выходе генераторов при снижении мощности $t_{u de}$, с	≤ 4	2	2,7

Анализ результатов позволяет сделать следующий вывод: с переходом от традиционного пропорционального к оптимальному управлению показатели качества электроэнергии судовой сети ухудшаются. Этого следовало ожидать. Ведь для повышения маневренности электроходов гребные электродвигатели (при оптимальном управлении) переводятся в более напряженный режим работы. Это хорошо видно на рис. 2, *б* и рис. 3, *б*. С переходом к оптимальному управлению, более интенсивно растет относительное напряжение $\gamma = \frac{U}{U_n}$. По сравнению с пропорциональным законом управления (кривые 1 на рис. 2,б и 3,б)

оно увеличивается в среднем на 30 %. Начиная с $\alpha = 0,8$, темп нарастания напряжения снижается и с выходом на относительную частоту $\alpha = 1$, относительное напряжение также становится равным $\gamma = 1$. Такая тенденция проявляется и при сбросах, и при набросах нагрузки. Рост напряжения ведет к увеличению тормозного момента гребных электродвигателей и соответственно – к сокращению тормозного пути электрохода, что и является основной целью оптимизации законов управления. Увеличение нагрузок на гребные электродвигатели неизбежно сказывается на параметрах электроэнергии судовой сети. Но, как видно из табл. 4, эти показатели находятся в допустимых пре-

делах. Поэтому переход к предложенному оптимальному управлению следует считать целесообразным.

Выводы.

1. Сброс нагрузки не влияет на оптимальное управление. При набрасывании нагрузки степень ухудшения целевой функции зависит от соотношения суммарных мощностей системы электродвижения и общесудовых потребителей и колеблется в диапазоне от 3 до 26 %. Причем, чем больше суммарный ток общесудовых потребителей, тем больше степень ухудшения значения целевой функции – тем больше тормозной путь электрохода.

2. Переход к оптимальному управлению гребными электрическими установками несколько ухудшает, по сравнению с классическим пропорциональным

управлением, показатели качества электроэнергетики судовой сети при маневрировании судна. Но эти показатели не выходят за пределы, установленные международными стандартами.

3. У электроходов с единой электроэнергетической системой поиска оптимальных законов управления гребными электрическими установками при маневрировании можно осуществлять без учета включения и отключения общесудовых потребителей. Изменение нагрузки в общесудовой сети оказывает влияние на значение целевой функции (тормозной путь электрохода), но не влияет на оптимальные параметры законов управления.

Список литературы

1. Яровенко В. А. Метод расчета переходных режимов гребных электроэнергетических установок электроходов / В. А. Яровенко, П. С. Черников // *Электротехника і електромеханіка*. – 2017. – №6. С. 32–41. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.05.
2. Яровенко В. А. Расчет и оптимизация переходных режимов пропульсивных комплексов электроходов / В. А. Яровенко. – Одесса: Маяк, 1999. – 188 с.
3. Черников П. С. Влияние параметров электроходов на показатели качества работы электроэнергетических установок при маневрировании / П. С. Черников, В. А. Яровенко, Е. И. Зарицкая, // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії», Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – №5 (1281). – С. 46–54.
4. Яровенко В. А. Оптимальное управление гребными электродвигателями электроходов при реверсировании / В. А. Яровенко, П. С. Черников, Р. А. Варбанец, Е. И. Зарицкая // *Электротехника і електромеханіка*. – 2018. – №6. С. 38–46. doi: 10.20998/2074-272X.2018.6.05.
5. Айзенштадт Е. Б. 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., ил.
6. Кузнецов Н. А. Основы проектирования гребных электрических установок / Н. А. Кузнецов, П. В. Куропаткин, А. Б. Хайкин, Н. М. Хомяков — Ленинград: Издательство «Судостроение», 1972. — 656 с.
7. DSTU ISO 8528-5:2005 Установки генераторные переменного тока с приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания. Часть 5. Генераторные установки. — К. : Будстандарт, 2005. — 32 с.
- dov [Calculation method of transient regimes of electric ships' propelling electric plants.] *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no. 6, pp. 32–41. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.05.
2. Yarovenko V. A. *Raschet i optimizatsiya perekhodnykh rezhimov propul'sivnykh kompleksov elektrokhodov* [Calculation and optimization of transient modes of propulsion complexes of electric ships]. — Odessa: Mayak, 1999. — 188 p.
3. Chernikov P. S., Yarovenko V. A., Zaritskaya E. I., Vliyanie parametrov elektrokhodov na pokazateli kachestva raboty elektroenergeticheskikh ustanovok pri manevrirovaniі [Influence of electric ships' parameters on quality indices of electric power plants' performance at maneuvers]. *Visnyk NTU "KhPI" Seriya: "Elektrychni mashyny ta elektromekhanichne peretvorenniya enerhiyi"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 5, pp. 46–54.
4. Yarovenko V. A., Chernikov P. S., Varbanets R. A., Zaritskaya E. I. Optimal'noe upravlenie grebnymi elektrodvigatelyami elektrokhodov pri reversirovaniі [Optimal control of the electric ships' propulsion motors during reversal]. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no. 6, pp. 38–46. doi: 10.20998/2074-272X.2018.6.05.
5. Aizenshtadt E. B., Gilerovich Yu. M., Gorbunov B. A., Serzhanov V. V. *Grebnye elektricheskie ustanovki: Spravochnik* [Rowing electrical installations: Reference book]. — Leningrad: Shipbuilding Publ., 1985. — 304 p.
6. Kuznetsov N. A., Kuropatkin P. V., Khaikin A. B., Khomyakov N. M. *Osnovy proektirovaniia grebnnykh elektricheskikh ustanovok* [Basic design of rowing electrical installations]. — Leningrad: Shipbuilding Publ., 1972. — 656 p.
7. DSTU ISO 8528-5:2005. *Ustanovki generatoryne peremennogo toka s privodom ot porshnevnykh dvigateley vnutrennego sgoraniya. Chast' 5. Generatoryne ustanovki*. [Generator sets of alternating current with a drive from reciprocating internal combustion engines. Part 5. Generator settings.]. Kiev, Budstandart Publ. 2005. 32 p.

References (transliterated)

1. Yarovenko V. A., Chernikov P. S. Metod rascheta perekhodnykh rezhimov grebnnykh elektroenergeticheskikh ustanovok elektrokho-

Поступила (received) 11.03.2019

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вплив загальносудових споживачів електроенергії на оптимальне управління гребними електричними установками / П. С. Черников, В. А. Яровенко, Е. И. Зарицкая // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". — Х. : НТУ «ХПІ», 2019. — № 4 (1329). — С. 75-82. — Библиогр.: 7 назв. — ISSN 2409-9295.

Влияние общесудовых потребителей электроэнергии на оптимальное управление гребными электрическими установками / П. С. Черников, В. А. Яровенко, Е. И. Зарицкая // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". — Х. : НТУ «ХПІ», 2019. — № 4 (1329). — С. 75-82. — Библиогр.: 7 назв. — ISSN 2409-9295.

Influence of ship consumers of electric energy on optimal control of electrical propulsion plants / P. S. Chernikov, V. A. Yarovenko, E. I. Zaritskaya // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." — Kharkiv: NTU "KhPI", 2019. — No. 4 (1329). — P. 75-82. — Bibliogr.: 7. — ISSN 2409-9295.

«Сведения об авторах /About the Authors»

Черніков Павло Сергійович, Одеський національний морський університет, старший викладач кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики, (099)711-07-00; e-mail: chernikov@onmu.odessa.ua

Черников Павел Сергеевич, Одесский национальный морской университет, старший преподаватель кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики, (099)711-07-00; e-mail: chernikov@onmu.odessa.ua

Chernikov Pavel Sergeevich, Odessa National Maritime University, Senior Lecturer of the Department of exploitation of ship's electrical equipment and means of automation, +38 (099)711-07-00; e-mail: chernikov@onmu.odessa.ua

Яровенко Володимир Олексійович, доктор технічних наук, професор, Одеський національний морський університет, завідувач кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики, (050)598-06-83; e-mail: yarovenko@3g.ua

Яровенко Владимир Алексеевич, доктор технических наук, профессор, Одесский национальный морской университет, заведующий кафедрой эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики, (050)598-06-83; e-mail: yarovenko@3g.ua

Yarovenko Vladimir Alecseevich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Odessa National Maritime University, Chair of the Department of exploitation of ship's electrical equipment and means of automation, +38 (050)598-06-83; e-mail: yarovenko@3g.ua

Зарицька Олена Ігорівна, кандидат технічних наук, доцент, Одеський національний морський університет, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики, (093)368-49-16; e-mail: zarickaayalena74@mail.ru

Зарицкая Елена Игоревна, кандидат технических наук, доцент, Одесский национальный морской университет, доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики, (093)368-49-16; e-mail: zarickayalena74@mail.ru

Zaritskaya Elena Igorevna, Candidate of Technical Sciences, Odessa National Maritime University, Associate Professor of the Department of exploitation of ship's electrical equipment and means of automation, +38 (093)368-49-16; e-mail: zarickayalena74@mail.ru