

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

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОХОДОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРИ МАНЕВРИРОВАНИИ

Розглядаються маневрені режими гребних електроенергетичних установок електроходів. Запропоновано показники, що оцінюють якість виконання маневрових операцій. Вони оцінюють маневреність електроходів і якість електроенергії суднової мережі. Виявлено параметри, що впливають на ці показники. Оцінено ступінь їх впливу. Запропоновано аналітичні залежності, що показують внесок кожного параметра в відповідний показник. Виявлено значущі параметри. Показана можливість поліпшення показників якості при проектуванні електроенергетичних установок.

Ключові слова: гребні електроенергетичні установки, показники якості маневрування, залежності показників від параметрів електроходів.

Рассматриваются маневренные режимы гребных электроэнергетических установок электроходов. Предложены показатели, оценивающие качество выполнения маневренных операций. Они оценивают маневренность электроходов и качество электроэнергии судовой сети. Выявлены параметры, влияющие на эти показатели. Оценена степень их влияния. Предложены аналитические зависимости, показывающие вклад каждого параметра в соответствующий показатель. Выявлены значимые параметры. Показана возможность улучшения показателей качества при проектировании электроэнергетических установок.

Ключевые слова: гребные электроэнергетические установки, показатели качества маневрирования, зависимости показателей от параметров электроходов.

Urgency of the problem. At present, the most promising ships are the ships with an integral ship's electric power system. Such a power plant provides both a propulsion system and ship's general consumers with power. This significantly increases the requirements for the quality of the ship's electricity network. Electric ships have a considerable share of time working at maneuvers. Therefore, the urgent task is to increase the electric ship's maneuverability, at the same time ensuring the appropriate quality of electrical energy. **State of the issue under consideration.** During maneuvering regimes the duration of the transient processes in electrical propulsion power plant (EPP) are commensurable with the duration of the transient regimes of the ship's movement. Therefore, the analysis of operating modes of EPP should be carried out in unity with all the components of an indivisible ship's propulsion complex, which includes EPP, propellers, and ship's hull. To analyze maneuvering regimes, a mathematical model and a calculation method have been developed. At the same time, the analysis of transient operating modes is complicated by the fact that the number of the parameters of the complex is large, and the amount of information necessary for their calculation is limited. It is necessary to identify significant parameters for each quality index of maneuvering and quality index of electrical energy. **The purpose of this paper** is to find meaningfully influencing parameters, to identify the nature and extent of their influence. **Method of solving the problem.** The search for significant parameters and the quantitative assessment of the degree of their influence is based on the calculation results of the current values of the regime indices of EPP while carrying out major maneuvers. On their basis, the main quality indices of maneuvering and quality indices of the ship's electrical energy are estimated. **Results of the research.** Numerical calculations of transient regimes of EPP at maneuvers and the processing of their results allowed us to analyze the influence of changing the values of the electric ships' parameters on selected quality indices. Based on the results of the analysis, parameters with significant influence were identified. The degree of influence of each parameter on the corresponding quality index is represented by polynomial dependencies with contributions to each parameter. The influence of the other parameters is unessential and they can be assumed to be invariable in the future. **Conclusions.** Significant parameters, among all the parameters influencing the quality indices of electric ships' EPP, were revealed. This enables us to identify the objective laws of the processes under consideration, and in the future to reduce the amount of computing work. The proposed analytical dependences show the ways to improve the quality of transient processes of EPP at the earliest stages of design.

Key words: electrical propulsion power plants, quality indices of maneuvering, dependences of indices on electric ships' parameters.

Актуальность задачи. В последние годы в теории и практике электродвижения все большее внимание уделяется электроходам с единой судовой электроэнергетической системой (ЕЭЭС). Такая установка обеспечивает питание и систему электродвижения (гребную электрическую установку) и общесудовые потребители. Как показывает практика, ЕЭЭС обладают рядом неоспоримых преимуществ перед автономными системами электродвижения. В наибольшей степени эти преимущества проявляются на: судах, у которых есть мощные потребители, работающие в режиме, раздельном во времени от системы электродвижения; на судах, работающих в режиме позиционирования; на кораблях военно-морского флота с мощными комплексами вооружения. Применение единых систем электродвижения позволяет: сократить количество генераторных агрегатов, уменьшить массогабаритные характеристики источников электроэнергии, снизить расход энергии и вредных выбросов в окружающую среду, улучшить компоновку энергетического оборудования (высвободив при этом дополнительные площади), повысить надежность судовой

вой электроэнергетической установки.

Вместе с тем, тот факт, что общесудовые потребители электроэнергии получают питание от общих шин судовой электростанции, существенно повышает требования к качеству электроэнергии. В соответствии с требованиями международного стандарта [7], это качество определяется следующими основными показателями:

- частотными характеристиками;
- характеристиками напряжения;
- пусковыми характеристиками дизель-генераторов;
- характеристиками параллельной работы дизель-электрических агрегатов.

Известно, что одним из основных аргументов в пользу применения электродвижения является высокая маневренность электроходов. Именно высокие маневренные свойства (а это – неоспоримое преимущество электродвижения перед традиционным типом привода судовых движителей) в первую очередь обеспечивают безопасность выполнения судами маневренных операций [1]. Гребная электрическая уста-

© П.С. Черников, В.А. Яровенко, Е.И. Зарицкая, 2018

новка – наибольший по мощности потребитель, поэтому переходные режимы ее работы неизбежно скажутся на параметрах судовой сети. Исходя из этого, показатели качества маневрирования и показатели качества электроэнергии (на маневрах) должны рассматриваться как единый комплекс показателей работы ЕЭЭС. Повышение маневренности электроходов с обеспечением при этом соответствующего [7] качества электроэнергии является весьма актуальной задачей.

Состояние рассматриваемого вопроса. На маневрах продолжительности переходных процессов в гребной электроэнергетической установке (ГЭЭУ) соизмеримы [1] с продолжительностями переходных процессов движения самого судна. Поэтому анализ режимов работы ГЭЭУ следует проводить в единстве со всеми составными частями судового пропульсивного комплекса, включающего в себя и ЕЭЭС, и гребные винты, и корпус судна.

Для расчета переходных процессов и оценки маневренных характеристик ГЭЭУ электроходов в работе [3] разработана математическая модель. Однако, представленное в ней математическое описание переходных процессов в ГЭЭУ не учитывало динамические режимы работы тепловых двигателей и синхронных генераторов. В соответствии с этим, не учитывалось влияние на показатели качества маневрирования параметров тепловых двигателей, регуляторов скорости вращения, системы автоматического регулирования напряжения синхронных генераторов и систем распределения нагрузки между генераторными агрегатами. А это влияние может быть весьма существенным. Упрощенное описание динамики генераторных агрегатов не позволяло также оценить и показатели качества электроэнергии при выполнении маневренных операций. Таким образом, математическое описание переходных процессов в ГЭЭУ, представленное в работе [3], оказывается непригодным для электроходов с единой электроэнергетической системой.

Для анализа маневренных режимов электроходов с ЕЭЭС в [1] предложены уточненная математическая модель и метод расчета переходных режимов ГЭЭУ как составной части судового пропульсивного комплекса. В ней представлено уточненное математическое описание переходных процессов в генераторных агрегатах судовой электростанции. В частности: первичные двигатели описаны уравнениями, учитывающими процессы в регуляторах скорости их вращения, с возможностью регулирования процесса распределения активной мощности; синхронные генераторы представлены уравнениями Парка-Горева, с учетом возможности распределения реактивной мощности.

Математическая модель приведена к относительным единицам. Выявлены критерии динамического подобия пропульсивных комплексов. Это – безразмерные параметры системы «тепловые двигатели – гребная электрическая установка – движители – корпус судна». Именно эти параметры влияют на текущие значения относительных режимных показателей составных частей комплекса и определяют численные значения показателей качества маневрирования и качества электроэнергии.

Анализ переходных режимов работы, с целью их дальнейшего улучшения затруднен тем, что число безразмерных параметров велико, а объем информации, необходимой для их расчета, на начальных стадиях проектирования объектов весьма ограничен. Поэтому определение численных значений этих параметров весьма проблематично. Количественный анализ поведения ГЭЭУ на маневрах и поиски путей улучшения маневренных характеристик оказываются нереализуемыми.

В тоже время известно [2, 3], что значимое влияние на показатели качества работы сложных электро-механических систем оказывает лишь небольшое (до 6–10) число параметров. В соответствии с этим, необходимо выявить по каждому показателю качества значимые параметры и оценить вклады этих параметров в соответствующие показатели. Остальные параметры можно будет отнести к шумовому полю и в дальнейших исследованиях считать неварьируемыми. Это позволит в дальнейшем существенно сократить объем вычислительных процедур.

Поиск значимо влияющих параметров, выявление характера и степени их влияния и является **целью настоящей работы**.

Метод решения задачи. Разработанный в [1] метод позволяет рассчитывать текущие значения основных режимных показателей ГЭЭУ как в установившихся, так и в динамических режимах работы и оценивать основные показатели качества работы электроходов на маневрах. Предложенное математическое описание дает возможность учитывать при маневрировании влияние переходных режимов в гребной электрической установке на работу общесудовых потребителей электроэнергии. Это позволяет ввести в состав основных показателей качества ряд дополнительных (по сравнению с работой [3]), критериев, характеризующих динамические параметры напряжения и частоты на выходе генераторов (согласно стандарту ISO 8528-5). В частности:

- отклонение напряжения в переходном процессе при повышении нагрузки или ее снижении (δU_{dyn}^- , δU_{dyn}^+);
- время восстановления напряжения (t_{uin} , t_{ude});
- отклонение частоты в переходном процессе (от начальной частоты) при повышении нагрузки или ее снижении (δf_{dyn}^- , δf_{dyn}^+);
- время восстановления частоты (t_{fin} , t_{fde}).

Эти показатели характеризуют качество электроэнергии судовой сети.

В основе поиска значимо влияющих параметров и количественной оценки степени их влияния лежат результаты расчетов переходных режимов ГЭЭУ в составе пропульсивных комплексов на маневрах. На рис. 1, в качестве примера, приведены текущие значения основных режимных показателей при выполнении электроходом комбинации нескольких маневров «разгон ГЭЭУ – реверс ГЭЭУ на задний ход – реверс ГЭЭУ с заднего хода на передний». На таком «комбинированном маневре» в наибольшей степени «проявляются» динамические показатели работы ГЭЭУ.

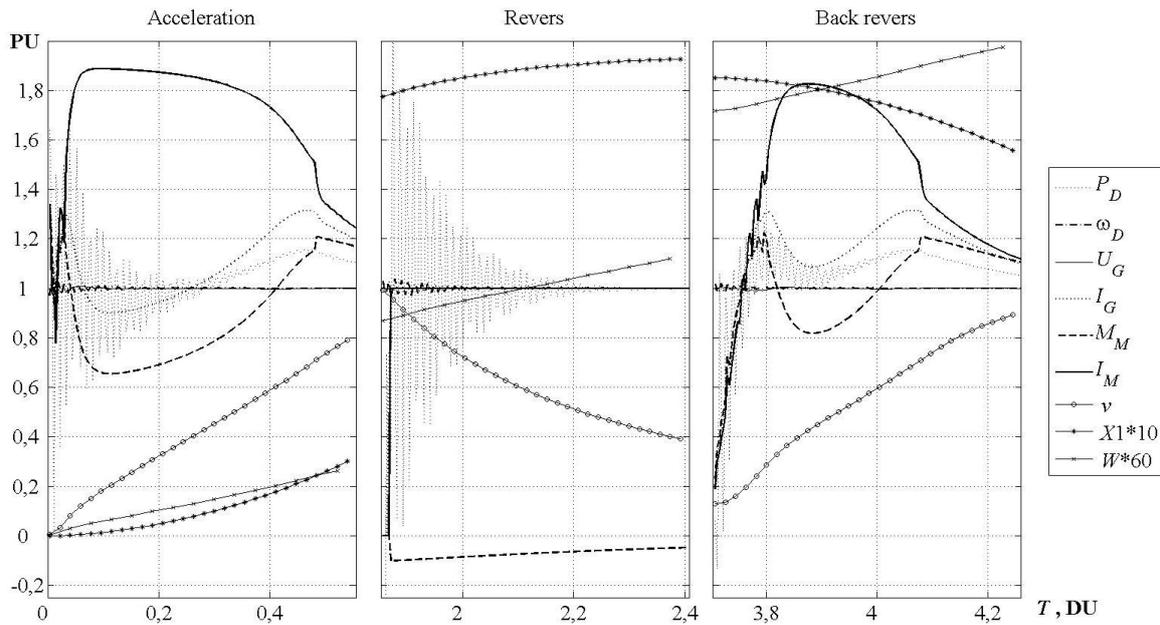


Рис.1 – Текущие значения основных режимных показателей электрохода при выполнении комбинации маневров "разгон – реверс на задний ход – реверс с заднего хода на передний"

На рисунке показаны относительные:

- P_D и ω_D – мощность и угловая скорость вращения первичных двигателей;
- U_G и I_G – напряжение и ток на выходе генераторов;
- M_M и I_M – вращающий момент и ток гребных электродвигателей (ГЭД);
- v – скорость судна;
- $X1$ – пройденный путь;
- W – затраты энергии.

Относительное время при этом определяется:

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

где v_0 – скорость движения судна;

L – длина судна;

t – текущее, по ходу выполнения маневра, время.

(Индекс "0" относится к режиму работы, соответствующему движению судна с номинальной мощностью двигателей по спокойной свободной воде).

Результаты многочисленных расчетов переходных режимов при различных маневрах [3, 4], практика проектирования и эксплуатации электроходов [5, 6], рекомендации [7] по оценке качества электроэнергии судовой сети дают основания предложить для оценки качества работы ГЭЭУ (в составе пропульсивных комплексов) на маневрах следующие показатели:

- максимальное приращение мощности первичных двигателей

$$P_{Dm} = P_{Dmax} / P_{Dstd};$$

- относительное отклонение частоты на выходе генераторов при повышении

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

и снижении нагрузки

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

- относительное отклонение напряжения на выходе генераторов при повышении

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

и снижении нагрузки

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

- время восстановления напряжения на выходе генераторов при повышении t_{uin} и снижении мощности t_{ude} ;

- броски тока генераторов при разгоне

$$I_{Gacc} = I_{Gaccmax} / I_{Gaccstd}$$

- и при реверсе

$$I_{Grev} = I_{Grevmax} / I_{Grevstd};$$

- время восстановления частоты на выходе генераторов при повышении t_{fin} и снижении мощности t_{fde} ;

- броски вращающего момента ГЭД при разгоне

$$M_{Macc} = M_{Maccmax} / M_{Maccstd}$$

- и при реверсе

$$M_{Mrev} = M_{Mrevmax} / M_{Mrevstd};$$

- броски тока ГЭД при разгоне

$$I_{Macc} = I_{Maccmax} / I_{Maccstd}$$

- и при реверсе

$$I_{Mrev} = I_{Mrevmax} / I_{Mrevstd};$$

- максимальная скорость судна к концу маневра – v_{max} ;

- продолжительность выполнения маневра – T_M ;

- пройденный судном путь по окончанию маневра – $X1$;

- относительные затраты энергии на выполнение маневра – W ;

- продолжительность разгона электрохода до заданного значения скорости судна – T_{Mpsset} (здесь и далее под заданной будет подразумеваться скорость $v = 0,95 v_0$);

- пройденный судном путь до заданного значения скорости судна – $X1_{pset}$;
- относительные затраты энергии до заданного значения скорости судна – W_{pset} .

Численные значения этих показатели качества (кроме W), определяются в ходе расчетов текущих значений (например, рис.1) соответствующих режимных показателей. Относительные затраты энергии W рассчитываются [4] по соотношению

$$\overline{W} = \int_0^T g_e M_D \omega_D dT, \quad (1)$$

где \overline{M}_D и $\overline{\omega}_D$ – относительный момент и угловая скорость вращения теплового двигателя;

$g_e = g_e / g_{e0}$ – относительный текущий удельный расход топлива, определяемый [4] как

$$g_e = \begin{cases} 0,983 + 1,22(P_D - 0,882)^2, & \text{при } P_D \geq 0,882 \\ 0,983 + 0,315(P_D - 0,882)^2, & \text{при } P_D < 0,882 \end{cases} \quad (2)$$

Сравнительный анализ математических моделей, приведенных в работах [3] и [1], указывает на необходимость в оценке степени влияния на показатели качества маневрирования следующих безразмерных параметров:

- коэффициентов усиления по основному сигналу – K_{Uq} и по возмущающему воздействию – K_{Id} системы возбуждения синхронного генератора;
- коэффициентов усиления по регулируемой величине (изменению скорости вращения теплового двигателя) – K_P и жесткой обратной связи – K_{Fb} хода рейки топливного насоса;
- критерия динамического подобия теплового двигателя N_D ;
- энерговооруженности электрохода – N_X ;
- критерия динамического подобия N_M и безразмерных параметров C_{M17} , C_{M18} , C_{M20} , C_{M23} частотно-управляемого ГЭД.

Численные значения этих параметров и критериев подобия рассчитываются [1] по соотношениям:

$$K_{Uq} = \frac{U_{G0}}{U_{f0}}; K_{Id} = \frac{I_{G0} x_d}{U_{f0}};$$

$$C_{M17} = \frac{b_M^2}{r_{2M}^2}; C_{M18} = \frac{c_M^2}{r_{2M}^2} \alpha_0^2;$$

$$C_{M20} = \frac{\omega_{M0}}{\omega_{MH}}; C_{M23} = 2 \frac{r_{1M}}{r_{2M}'} \alpha_0$$

$$N_D = \frac{M_{D0} L}{J_D \omega_{D0} v_0}; N_M = \frac{M_{M0} L}{J_M \omega_{M0} v_0}; N_X = \frac{LP_{e0}}{(m + \lambda_{11}) v_0^2},$$

где U_{G0} и I_{G0} – напряжение и ток генератора;

U_{f0} – напряжение обмотки возбуждения генератора;

x_d – синхронное индуктивное сопротивление по оси d ;

ω_{D0} – угловая скорость вращения первичного двигателя;

ω_{M0} и ω_{1Mn} – угловые скорости вращения ротора и магнитного поля статора ГЭД при номинальной частоте;

α_0 – относительная частота напряжения ГЭД;

r_{1M} и r_{2M}' – активное сопротивление статора и приведенное активное сопротивление ротора ГЭД;

b_M, c_M, d_M, e_M – постоянные коэффициенты частотно-управляемого асинхронного электродвигателя;

M_{D0}, M_{M0} – вращающие моменты первичного двигателя и ГЭД соответственно;

J_D, J_M – приведенные к валу первичного двигателя и ГЭД (соответственно) моменты инерции вращающихся частей;

m и λ_{11} – масса судна и присоединенные массы воды вдоль его продольной оси;

P_{e0} – полезный суммарный упор гребных винтов.

Результаты исследований. Анализ конструктивных и основных технических параметров существующих электроходов позволил определить возможные диапазоны изменения отмеченных выше безразмерных параметров и критериев подобия.

Серии численных расчетов переходных режимов ГЭЭУ на маневрах (выполненные по разработанному [1] методу расчета) и обработка их результатов позволили проанализировать влияние изменения значений (во всем возможном диапазоне их изменения) всех отмеченных коэффициентов и критериев динамического подобия на выбранные показатели качества маневрирования. По результатам анализа из всей совокупности параметров выявлены те, влияние которых на выбранные показатели качества значимо, с вкладом более 2%. Это безразмерные параметры: $N_D, N_X, N_M, C_{M17}, C_{M18}, C_{M20}, C_{M23}$. Влияние остальных параметров – $K_{Uq}, K_{Id}, K_P, K_{Fb}$ – несущественно, и их можно (теперь уже обоснованно) отнести к шумовому полю и в дальнейшем принимать неварьируемыми.

В качестве примера, в табл. 1 показано влияние на показатели качества маневрирования изменения значений безразмерных параметров N_X и C_{M23} . При этом, в ходе численных экспериментов, для выявления степени влияния параметров комплекса на показатели качества, обратные связи систем автоматического регулирования были «отключены». В результате, численные значения показателей качества получаются явно завышенными, однако это позволяет выявить степень значимости влияния каждого параметра. Именно это и является целью настоящей работы.

Окончательные результаты анализа влияния безразмерных параметров на выбранные показатели качества маневрирования приведены в табл. 2. При этом вклады, величиной менее 2 % (0,2 % – для относительного отклонения частоты и относительного отклонения напряжения на выходе генераторов при повышении нагрузки) не учитываются.

Таблица 1 – Влияние изменения безразмерных параметров N_X и C_{M23} на основные показатели качества маневрирования при реверсе судна

Показатель качества	Влияние параметра N_X						Влияние параметра C_{M23}					
	0,13	0,14	0,16	0,18	0,20	0,21	0,03	0,32	0,60	0,90	1,20	1,47
Максимальное приращение мощности первичных двигателей P_{Dm}	2,33	1,92	1,93	1,41	1,97	1,89	1,87	1,36	1,39	1,40	1,41	1,41
Относительное отклонение частоты на выходе генераторов при повышении нагрузки δf_{dyn}^- , %	10,8	7,55	8,69	6,69	8,94	8,66	6,65	5,99	6,62	6,7	6,7	6,69
Относительное отклонение напряжения на выходе генераторов при повышении нагрузки δU_{dyn}^- , %	2,92	3,9	3,86	1,8	6,12	4,64	3,61	1,86	1,83	1,86	1,88	1,8
Время восстановления напряжения на выходе генераторов при повышении мощности t_{uin} , с	2,05	1,4	1,4	1,1	1,4	1,35	1,3	1,15	1,15	1,1	1,1	0,95
Броски тока генераторов при реверсе I_{Grev}	1,34	1,56	1,46	1,28	1,28	1,28	1,44	1,31	1,30	1,29	1,28	1,28
Время восстановления частоты на выходе генераторов при повышении мощности t_{fin} , с	2,55	2,05	1,7	0,55	1,05	1,25	1,25	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
Броски вращающего момента ГЭД при реверсе M_{Mrev}	1,26	1,59	1,39	1,15	1,32	1,27	1,48	1,24	1,23	1,21	1,19	1,13
Броски тока ГЭД при реверсе I_{Mrev}	1,94	2,06	1,95	1,82	1,82	1,85	1,8	1,83	1,83	1,82	1,82	1,82
Максимальная скорость v_{max} , о.е.	0,91	0,95	0,98	0,99	0,99	0,99	1	1	0,99	0,99	0,99	0,99
Время маневра T_M , о.е.	1,82	1,49	1,26	1,29	1,4	1,43	1,13	1,18	1,2	1,23	1,27	1,32
Выбег $X1$, о.е.	11,6	12,1	10,9	11,9	14	14,8	10,5	10,9	11	11,3	11,6	12
Затраты энергии W , о.е.	106	85,5	74,2	73	81	80,6	68,5	67	68,3	70,1	72,2	74,7
Время выхода на заданную скорость T_{Mpsets} , о.е.	-	-	0,9	0,73	0,67	0,72	0,61	0,66	0,69	0,72	0,75	0,78
Выбег на заданную скорость $X1_{psets}$, о.е.	-	-	6,41	4,9	4,66	5,54	3,8	4,3	4,5	4,8	5	5,3
Затраты энергии до достижения судном заданной скорости W_{psets} , о.е.	-	-	53,9	42,3	41	41,9	40,1	39,1	40,4	42	43,5	45,2

Таблица 2 – Вклады безразмерных параметров в показатели качества маневрирования при реверсе ГЭУ электрохода

Показатель качества маневрирования	Вклады безразмерных параметров						
	N_D	N_X	N_M	C_{M17}	C_{M18}	C_{M20}	C_{M23}
Максимальное приращение мощности первичных двигателей P_{Dm}	19,1	66	-	-	6,8	6,7	52,8
Относительное отклонение частоты на выходе генераторов при повышении нагрузки δf_{dyn}^-	4,9	4,1	-	-	-	-	2,7
Относительное отклонение напряжения на выходе генераторов при повышении нагрузки δU_{dyn}^-	0,5	4,3	-	-	0,5	0,5	2
Время восстановления напряжения на выходе генераторов при повышении мощности $t_{u in}$	13,7	86,4	-	-	50	18,2	31,8
Броски тока генераторов при реверсе I_{Grev}	-	21,6	-	-	13	-	12,4
Время восстановления частоты на выходе генераторов при повышении мощности $t_{f in}$	54,6	363,6	-	-	-	-	127,3
Броски вращающего момента ГЭД при реверсе M_{Mrev}	-	38,5	4	-	32,2	4,3	30,5
Броски тока ГЭД при реверсе I_{Mrev}	-	13,6	-	-	24,2	8,4	-
Максимальная скорость v_{max}	-	8,9	-	-	2,6	5,7	1,1
Время маневра T_M	3,2	45,3	4,7	3,8	38,2	24,1	14,7
Выбег $X1$	4,2	34,3	6,3	5,3	19,3	23,7	13,4
Затраты энергии W	6,3	47,5	4,5	3,7	37,7	29,6	10,8
Время выхода на заданную скорость T_{Mpsset}	-	57,4	-	-	64,2	14,2	23,1
Выбег на заданную скорость $X1_{psset}$	-	82	-	-	51,5	36,9	29,5
Затраты энергии до достижения судном заданной скорости W_{psset}	7	55,8	-	-	58,1	11	13,8

Степень значимости влияния каждого параметра на соответствующий показатель качества можно представить полиномиальными зависимостями с весовыми вкладами по каждому параметру. Эти вклады будем определять как

$$s_{ik} = \frac{\Delta J_k(\Delta q_i)}{J_k}, \quad (3)$$

где $\overline{J_k}$ – среднее значение показателя качества;

$\Delta J_k(\Delta q_i)$ – максимальное приращение показателя качества при изменении q_i -го безразмерного параметра в полном диапазоне его изменения.

По результатам табл. 2 для каждого показателя качества получены уравнения вкладов безразмерных параметров в соответствующий показатель:

– максимальное приращение мощности тепловых двигателей

$$P_{Dm} = 1,41 - 19,1 N_D - 66 N_X + 6,8 C_{M18} - 6,7 C_{M20} + 52,8 C_{M23}; \quad (4)$$

– относительное отклонение частоты на выходе генераторов при повышении нагрузки

$$\delta f_{dyn}^- = 6,7 + 4,9 N_D - 4,1 N_X + 2,7 C_{M23}; \quad (5)$$

– относительное отклонение напряжения на выходе генераторов при повышении нагрузки

$$\delta U_{dyn}^- = 1,81 + 0,5 N_D + 4,3 N_X + 0,5 C_{M18} - 0,5 C_{M20} - 2 C_{M23}; \quad (6)$$

– время восстановления напряжения на выходе генераторов при повышении мощности

$$t_{u\ in} = 1,1 + 13,6 N_D - 86,4 N_X - 50 C_{M18} + 18,2 C_{M20} - 31,8 C_{M23}; \quad (7)$$

– броски тока генераторов при реверсе

$$I_{Grev} = 1,3 + 21,6 N_X - 13 C_{M18} - 12,4 C_{M23}; \quad (8)$$

– время восстановления частоты на выходе генераторов при повышении мощности

$$t_{f\ in} = 0,55 + 54,6 N_D - 363,6 N_X - 127,3 C_{M23}; \quad (9)$$

– броски вращающего момента ГЭД при реверсе

$$M_{Mrev} = 1,15 + 38,5 N_X - 4 N_M - 32,2 C_{M18} - 4,3 C_{M20} - 30,5 C_{M23}; \quad (10)$$

– броски тока ГЭД при реверсе

$$I_{Mrev} = 1,82 - 13,6 N_X + 24,2 C_{M18} - 8,4 C_{M20}; \quad (11)$$

– максимальная скорость к концу маневра

$$v_{MAX} = 0,99 + 8,9 N_X - 2,6 C_{M18} - 5,7 C_{M20} - 1,1 C_{M23}; \quad (12)$$

– продолжительность маневра

$$T_M = 1,26 - 45,3 N_X + 4,7 N_M + 3,8 C_{M17} + 38,2 C_{M18} - 24,1 C_{M20} + 14,7 C_{M23}; \quad (13)$$

– выбег судна

$$X1 = 11,4 - 4,2 N_D + 34,3 N_X + 6,3 N_M - 5,3 C_{M17} + 19,3 C_{M18} - 23,7 C_{M20} + 13,4 C_{M23}; \quad (14)$$

– затраты энергии

$$W = 71,7 - 6,3 N_D - 47,5 N_X + 4,5 N_M + 3,7 C_{M17} + 37,7 C_{M18} - 29,6 C_{M20} + 10,8 C_{M23}; \quad (15)$$

– время выхода на заданную скорость

$$T_{Mpsset} = 0,76 - 57,4 N_X + 64,2 C_{M18} - 14,2 C_{M20} + 23,1 C_{M23}; \quad (16)$$

– выбег на заданную скорость

$$X1_{psset} = 5,1 - 82,1 N_X + 51,5 C_{M18} + 36,9 C_{M20} + 29,5 C_{M23}; \quad (17)$$

– затраты энергии до достижения судном заданной скорости

$$W_{psset} = 44 - 7 N_D - 55,8 N_X + 58,1 C_{M18} - 11 C_{M20} + 13,8 C_{M23}. \quad (18)$$

Безразмерные параметры используются в уравнениях (4)–(18) в нормированном виде. Нормирование проводится по соотношению

$$q_i^n = \frac{q_i - q_{i0}}{\Delta q_i},$$

где q_{i0} – среднее значение i -го параметра;

$\Delta q_i = q_{imax} - q_{imin} = q_{i0} - q_{imin}$ – диапазон изменения i -го параметра.

Таким образом, в соответствии с поставленной целью, из совокупности параметров, влияющих на показатели качества работы ГЭЭУ электроходов на маневрах, выявлены значимые параметры. Полученные аналитические зависимости показывают степень и характер их влияния. Остальные параметры можно обоснованно отнести «к шумовому полю» и в дальнейших исследованиях считать неварьируемыми.

Разработанные аналитические зависимости позволяют не только оценивать влияние параметров пропульсивного комплекса на основные показатели качества работы ГЭЭУ, но и уже на самых начальных этапах проектирования отыскивать пути улучшения этих показателей.

Проиллюстрируем это применительно к маневру "реверс электрохода".

Поставим задачу – попытаться уменьшить относительное отклонение напряжения на выходе генераторов при повышении нагрузки до 1 %. Из уравнения (6) видно, что параметрами, оказывающими наиболее значимое влияние на этот показатель, являются параметры N_X и C_{M23} , а также, в равной степени, N_D , C_{M18} и C_{M20} .

Для того, чтобы δU_{dyn}^- стало равным 1 %, необходимо, чтобы сумма всех (за исключением первого) слагаемых правой части стала равной (–0,81). Иными словами:

$$-0,81 = 0,5 N_D + 4,3 N_X + 0,5 C_{M18} - 0,5 C_{M20} - 2 C_{M23}; \quad (19)$$

Анализ зависимости (19) показывает, что для уменьшения относительного перепада напряжения на выходе генераторов необходимо параметры N_X и C_{M23} оставить на уровне средних значений ($N_X = 0,17$; $C_{M23} = 1,26$), параметр C_{M20} увеличивать до максимального ($C_{M20} = 0,97$), а параметр C_{M18} уменьшать до минимального значения ($C_{M18} = 15,7$). Параметр N_D должен принимать значение немногим более среднего (1,29) и будет определен из уравнения вкладов.

Уравнение вкладов (19) при этом примет вид:

$$0,81 = 2(0) - 0,5 N_D - 4,3(0) - 0,5(-1) + 0,5(1) = 1 - 0,54 N_D; \quad (20)$$

Нормированное значение параметра $N_D^n = 0,352$.

Следовательно, безразмерное значение параметра $N_D = 1,58$.

В качестве примера рассмотрим проект конкретного электрохода (назовем его «Project») и его ГЭЭУ (табл. 3).

Таблица 3 – Основные характеристики электрохода «Project»

Длина судна по к.в.л.	160 м
Скорость судна	22 узла
Номинальные параметры турбогенераторов:	
количество	2
мощность	36 МВт
напряжение	10,5 кВ
частота вращения	3000 об/мин
частота питания	50 Гц
Номинальные параметры гребных электродвигателей:	
количество	3
мощность	20 МВт
напряжение	3 кВ
ток статора	4496 А
частота вращения	120-165 об/мин
Трансформаторы отбора мощности:	
количество	4
мощность	2,5 МВА

Численные значения соответствующих безразмерных параметров, рассчитанные по приведенным выше соотношениям, приведены в табл. 4.

Вернемся к соотношениям, по которым рассчитываются безразмерные параметры. В них L , v_0 , P_{e0} , m , λ_{11} – являются заданными (это параметры судна) и изменяться не могут. Исходя из этого, как следует из полученных соотношений, для поддержания относительного перепада напряжения на выходе генераторов в пределах 1 % необходимо:

- уменьшить момент инерции J_D , приведенный к валу теплового двигателя либо увеличить отношение M_{D0} / ω_{D0} на 23 %;
- уменьшить суммарный упор винтов на 15 %;
- увеличить отношение C_M / r_{2M} на 29 %;
- уменьшить скольжение ротора АД с 0,04 до 0,03;
- увеличить на 5 % отношение r_{1M} / r_{2M} .

Проведенный анализ и его рекомендации носят в определенной степени условный характер, поскольку не учитывают влияния этих параметров на другие показатели качества (в некоторых случаях они могут быть нереализуемы). Однако, они четко показывают влияние на качество работы ГЭЭУ основных параметров электроходов и могут быть учтены на предварительных этапах проектирования ГЭЭУ.

Выводы.

1. При анализе динамических режимов работы сложных электромеханических систем важной задачей является определение значимо влияющих параметров и оценка степени их влияния. Это способствует

ет целенаправленности исследований, выявлению объективных закономерностей рассматриваемых процессов, сокращению объема вычислительных работ.

Таблица 4 – Значения безразмерных параметров электрохода «Project»

Параметр	Численные значения параметров	
	"Project"	Требуемое значение
N_D	1,282	1,58
N_X	0,2	0,17
C_{M18}	23,73	63,95
C_{M20}	0,96	0,97
C_{M23}	1,2	1,26

2. Из совокупности параметров, влияющих на показатели качества работы ГЭЭУ электроходов, выявлены значимые параметры. Получены аналитические зависимости, показывающие характер и степень их влияния. Остальные параметры можно принимать неварьируемыми.

3. Предложенные зависимости показывают возможные пути улучшения качества переходных процессов ГЭЭУ электроходов уже на начальных стадиях их проектирования.

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. Оценка маневренных характеристик электроходов на начальных стадиях их проектирования / В. А. Яровенко, Е. И. Зарицкая, П. С. Черников // *Вісник НТУ «ХП»*. Серія «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії, Харків: НТУ «ХП», 2017. – №1 (1223). С. 57-63.
3. Яровенко В. А. Расчет и оптимизация переходных режимов пропульсивных комплексов электроходов / В. А. Яровенко. – Одесса: Маяк, 1999. – 188 с.
4. Небеснов В. И. Оптимальные режимы работы судовых комплексов / В. И. Небеснов. – М.: Транспорт, 1974. – 199 с.
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. ДСТУ ISO 8528-5:2005 Установки генераторные переменного тока с приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания. Часть 5. Генераторные установки. – К.: Будстандарт, 2005. – 32 с.

References (transliterated)

1. Yarovenko V. A., Chernikov P. S. Metod rascheta perekhodnykh rezhimov grebnykh elektroenergeticheskikh ustanovok elektrokhodov [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., Zaritskaya E. I., Chernikov P. S. Otsenka manevrennykh kharakteristik elektrokhodov na nachal'nykh stadiyakh ikh proektirovaniya [Evaluation of electric ships' maneuverability on the initial stages of their designing]. *Visnyk NTU "KhPI" Seriya: "Elek-*

- trychni mashyny ta elektromekhanichne peretvorennia enerhiyi*" [Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion. "]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2017, no. 1, pp. 57-63.
3. 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.
 4. Nebesnov V. I. *Optimal'nye rezhimy raboty sudovykh kompleksov* [Optimal operating modes of ship complexes]. – Moscow: Transport, 1974. – 199 p.
 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 grebnykh 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.

Поступила (received) 14.02.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вплив параметрів електроходів на показники якості роботи електроенергетичних установок при маневруванні / П. С. Черніков, В. О. Яровенко, О. І. Зарицька // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електро механічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 46–54. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2409-9295.

Влияние параметров электроходов на показатели качества работы электроэнергетических установок при маневрировании / П. С. Черников, В. А. Яровенко, Е. И. Зарицкая // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електро механічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 46–54. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2409-9295.

Influence of electric ships' parameters on quality indices of electric power plants' performance at maneuvers / P. S. Chernikov, V. A. Yarovenko, E. I. Zaritskaya // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 46–54. – 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 кафедры 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