

УДК 629.12-8:629.12.037

В. А. ЯРОВЕНКО, Е. И. ЗАРИЦКАЯ

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В ПРОЕКТИРОВАНИИ ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОХОДОВ

Предложено проектирование гребных электрических установок электроходов осуществлять по показателям качества работы судна, как старшей системы. Разработана процедура поиска оптимальных решений при параметрической оптимизации на ранних стадиях проектирования. Проиллюстрирована эффективность предложенной процедуры на примере реального судна.

Ключевые слова: гребные электрические установки, проектирование, системный подход.

Введение. В настоящее время в мировом судостроении продолжает расти интерес к внедрению систем электродвижения на судах, где эти системы традиционно устанавливались – паромов, танкерах, газовозах, судах промыслового флота и т.п. Вместе с тем, анализ специальных литературных источников показывает, что подавляющее большинство введенных в последние годы в эксплуатацию и строящихся крупнейших круизных лайнеров также имеют электрические гребные установки (ГЭУ). Это объясняется большой вариативностью выбора режимов движения, гибкостью и маневренностью электроэнергетической установки, безопасностью, низким уровнем шума и вибрации. Заказы на постройку круизных лайнеров с электродвижением неуклонно растут.

Находит поддержку все возрастающая тенденция применения дизель-электрических установок на военных кораблях. В первую очередь это объясняется тем, что судовая энергетическая установка (СЭУ) с электродвижением способна передать в распоряжение систем оружия и на общекорабельные нужды до 87,5% установленной мощности (против 2% у обычной СЭУ), что позволяет устанавливать на кораблях энергоёмкие виды вооружения: лазеры, электромагнитные пушки, системы электромагнитной защиты и т.п.

Одно из основных качеств, обусловивших причину столь высокого интереса к современным системам электродвижения – высокая маневренность судов, оборудованных гребными электрическими установками. Для рассмотренных классов судов маневренные режимы являются одними из основных режимов работы. В первую очередь, именно поведением электроходов на маневрах – наиболее тяжелых и ответственных операциях – определяются структура гребной электрической установки, ее комплектация, настройка и т.п.

При проектировании электроходов возникают дополнительные трудности, обусловлены тем, что на маневренных режимах работы продолжительности переходных процессов в электроэнергетической установке соизмеримы с продолжительностями переходных процессов в остальных составных частях всего судового пропульсивного комплекса [1]. Поэтому, традиционные допущения о постоянстве скорости движения судна на переходных режимах ГЭУ (равно как и аналогичное допущение о постоянстве частоты вращения гребных электродвигателей при анализе движения судна) приемлемы только в первом приближении. Более того, при системном принципе под-

хода к выработке тех или иных критериев (или комплексного критерия) оценки качества работы ГЭУ, должны быть в первую очередь удовлетворены требования старшей системы (судна), для обеспечения которой она – ГЭУ – предназначена [2].

В соответствии с этим, при проектировании гребных электрических установок электроходов их следует рассматривать как составные части единого судового пропульсивного комплекса, включающего в себя судовую электроэнергетическую установку, гребные винты и корпус судна. Сравнительные же оценки качества работы ГЭУ должны в первую очередь проводиться по критериям судна.

Анализ основных достижений. Анализ существующих методов анализа переходных режимов работы гребных электрических установок и проектирования судов с электродвижением выявил ряд недостатков. Наиболее значимые из них следующие.

1. Все исследования проводились применительно к конкретным типам ГЭУ, поэтому полученные результаты приемлемы только к рассматриваемым объектам, т.е. носят частный характер. Их нельзя распространять на широкий класс судов, нет возможности проведения сравнительного анализа достоинств и недостатков того или иного варианта конструкторских решений.

2. В подавляющем числе разработок под системой электродвижения (гребным электроприводом) подразумевают только электрическую часть ГЭУ без первичных двигателей и движителей [3]. Исследования переходных режимов выполнены при грубом допущении о постоянстве скорости движения судна на протяжении всего маневра (в лучшем случае – на отдельных его участках). Этим гребная установка обособляется от остальных составных частей единого судового пропульсивного комплекса, нарушается системный принцип подхода при решении задач анализа и синтеза гребных установок, исключается возможность оптимизации параметров и режимов работы электроходов по "конечному результату".

Необходим математический аппарат, позволяющий:

- проводить всесторонние исследования поведения гребных электрических установок на маневрах и оценивать качество их выполнения;
- обеспечивать системный принцип подхода к выработке рационального решения;
- осуществлять оптимальное проектирование гребных электрических установок в составе единого

© В. А. Яровенко, Е. И. Зарицкая, 2015

пропульсивного комплексу по конечному результату – разработке высокоэффективных судов с электродвижением.

Цель исследований. Оптимальное проектирование гребных электрических установок предполагает решение двух основных задач, объединяющих вопросы: а) "конструктивного" проектирования гребных электрических установок как составных частей пропульсивных комплексов электроходов; б) оптимально-

го управления ГЭУ. При этом сравнительные оценки качества проектирования ГЭУ должны проводиться, прежде всего, по критериям судна. Разработка стратегии поиска оптимальных решений при таком подходе и является целью настоящей работы.

Материал исследований. Электроэнергетическая установка современного электрохода представляет сложную электромеханическую систему, структурная схема которой представлена на рис. 1.

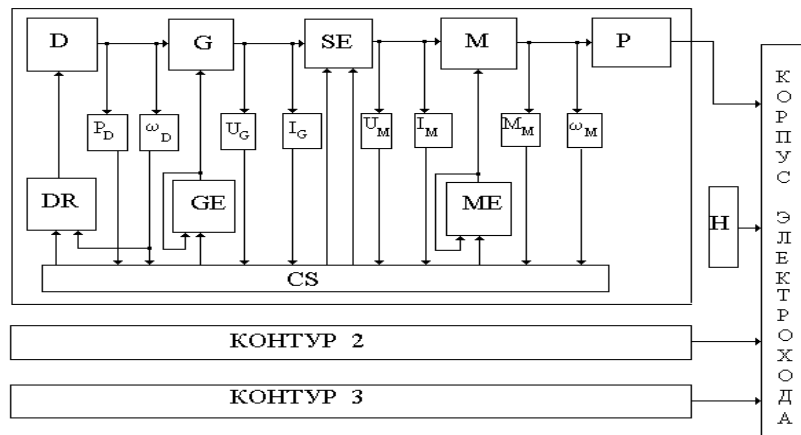


Рис. 1 – Структурная схема пропульсивного комплекса электрохода

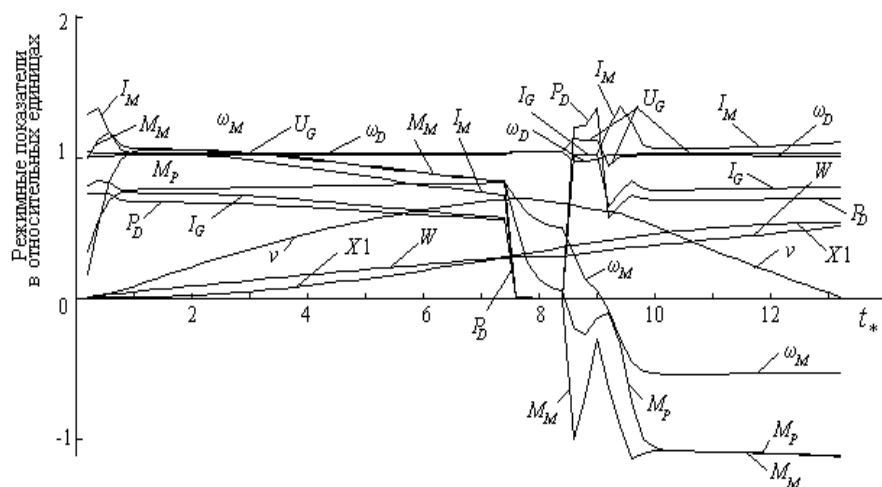


Рис. 2 – Текущие изменения режимных показателей ГЭУ

В состав каждого силового контура входят: тепловые двигатели – D , генераторы электрического тока – G , преобразователи электроэнергии – SE , гребные электродвигатели – M , регуляторы – DR , GE , ME и гребные винты – P . Кроме того, пропульсивный комплекс включает в себя руль – H и корпус судна.

На основе структурной схемы (рис.1) разработана математическая модель переходных режимов работы ГЭУ. Она приведена в работе [4]. Математическая модель представлена в относительных единицах, выявлены критерии динамического подобия – обобщенные безразмерные параметры гребной электрической установки в составе пропульсивного комплекса элек-

трохода. С ее помощью можно рассчитывать текущие значения основных режимных показателей ГЭУ и всех остальных составных частей пропульсивного комплекса на маневрах. (Характерными маневрами, по показателям качества выполнения которых можно судить о маневренных свойствах электрохода, традиционно считаются разгон, торможение, реверс, выход на циркуляцию).

В качестве примера, на рис. 2 приведены текущие (в относительных единицах) значения основных режимных показателей ГЭУ в пропульсивном комплексе электрохода по ходу выполнения маневра: "разгон электрохода до относительного значения скорости

движения $v_* = 0,7$ – реверс гребной электрической установки до остановки судна". Кривые приведены в безразмерном времени $t_* = v_0 t / L$. (Здесь: v_0 – скорость движения судна в установившемся базовом режиме работы, t – текущее время, L – длина судна). В качестве прототипа расчета выбран портовый дизель электрический ледокол с заменой его ГЭУ, выполненной по системе переменного-постоянного тока, на ГЭУ с частотно-управляемыми электродвигателями. В настоящей работе этому электроходу дано условное название "Прототип".

Основные характеристики судна: длина 56,3 м; ширина 16 м; осадка 4,2 м; водоизмещение 1763 т; мощность главных двигателей 2500 кВт; максимальная скорость движения 13 узлов.

В состав судовой энергетической установки входят:

- два дизель-генераторных агрегата типа ДГР 1000 / 750, каждый из которых содержит дизель 10Д 20,7 / 2 x 25,4 с эффективной мощностью 1100 кВт при 750 об/мин и генератор МСК 1270-750 мощностью 1000 кВт при 750 об/мин;
- преобразователи частоты;
- два асинхронных гребных электродвигателя (ГЭД), имеющих следующие основные параметры: мощность 1000 кВт; ток 1100 А; коэффициент мощности 0,835; вращающий момент 10670 Нм; угловая скорость вращения $93,67 \text{ c}^{-1}$.

Здесь: ω_D , M_D и P_D – угловая скорость вращения, вращающий момент и мощность первичных двигателей; W – относительные затраты энергии на выполнение маневра; U_G и I_G – напряжение и ток генераторов; U_M и I_M – напряжение и ток гребных электродвигателей (асинхронных ГЭД); M_M и ω_M вращающий момент и угловая скорость вращения ГЭД; M_P и P_P – момент сопротивления и упор гребных винтов; v – скорость движения судна.

На рис. 2, рис. 3, и ниже, при оценке качества маневрирования, все режимные показатели приведены в относительных единицах. Общепринятые индексы "*" при этом для облегчения восприятия информации опущены.

Возможность рассчитать текущие значения режимных показателей и проанализировать маневренные свойства электроходов безусловно представляет большой интерес. Однако для решения задач проектирования ГЭУ конкретных электроходов с наперед заданными их маневренными свойствами, куда большую ценность представляют сведения об отдельных, наиболее важных показателях качества выполнения маневров. Эта информация особенно нужна на ранних стадиях проектирования для сравнения различных вариантов конструкторских решений.

Анализ результатов многочисленных расчетов и существующая практика проектирования и эксплуатации судов с электродвижением [5] дают основания предложить для оценки их маневренных свойств ряд показателей. Это показатели, характеризующие безопасность маневрирования, экономические показатели

и показатели качества работы составных частей гребной электрической установки:

- продолжительность выполнения маневра t_{man} ;
- пройденный электроходом путь при маневрировании X_{man} ;
- относительные затраты энергии на выполнение маневра W_{man} ;
- электромагнитные потери в гребных электродвигателях P_{em} ;
- отклонение (от установившегося значения) угловой скорости вращения первичных двигателей

$$\Delta \omega_D = \frac{\omega_{Dmax} - \omega_{Dmin}}{\omega_{Ds}};$$

- максимальная мощность первичных двигателей

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

- броски тока генераторов при разгоне $(I_G)_{fm}$ и при реверсе $(I_G)_{revm}$

$$(I_G)_{fm} = (I_G)_{fmax} / (I_G)_{fs}, \quad (I_G)_{revm} = (I_G)_{revmax} / (I_G)_{revs};$$

- установившиеся значения тока генераторов при разгоне $(I_G)_{fs}$ и при реверсе $(I_G)_{revs}$;

- колебания напряжения на выходе генераторов

ΔU_G

$$\Delta U_G = \frac{U_{Gmax} - U_{Gmin}}{U_{Gs}}$$

- продолжительности разгона t_{Mf} и реверса t_{Mrev} ГЭД;

- броски тока ГЭД при разгоне $(I_M)_{fm}$ и при реверсе $(I_M)_{revm}$

$$(I_M)_{fm} = (I_M)_{fmax} / (I_M)_{fs}, \quad (I_M)_{revm} = (I_M)_{revmax} / (I_M)_{revs};$$

- броски вращающего момента ГЭД при разгоне $(M_M)_{fmax}$ и при реверсе $(M_M)_{revm}$

$$(M_M)_{fm} = (M_M)_{fmax} / (M_M)_{fs}, \quad (M_M)_{revm} = (M_M)_{revmax} / (M_M)_{revs};$$

- установившиеся значения вращающего момента ГЭД при разгоне $(M_M)_{fs}$ и при реверсе $(M_M)_{revs}$;

- установившиеся значения угловой скорости вращения ГЭД при разгоне $(\omega_M)_{fs}$ и при реверсе $(\omega_M)_{revs}$;

- продолжительности протекания переходных процессов в электроэнергетической установке при разгоне $(t_{SEP})_f$ и при реверсе $(t_{SEP})_{rev}$;

- продолжительность разгона электрохода t_{manf} ;

- продолжительность реверса ГЭД t_{Mrev} ;

- максимальная скорость судна к концу разгона $v_{max,fs}$

- пройденный электроходом путь по окончанию разгона $(X1)_{manf}$ и пройденный путь по окончанию торможения $(X1)_{manrev}$.

Совокупность перечисленных показателей, можно полагать, в достаточной степени охватывает каждую составную часть гребной электрической установки электрохода (и весь пропульсивный комплекс в целом) и обладает необходимой достаточностью для того, чтобы оценить нагрузки на элементы ГЭУ при работе электроходов на маневрах.

В соответствии с поставленной целью, комплексная оценка качества проектирования гребных электрических установок предполагает проведение многокритериальной оптимизации. По своей постановке эти задачи относятся к области нелинейного программирования и заключаются в отыскании экстремумов мультимодальных (как это показали серии предварительных расчетов) целевых функций $f(x)$ при заданных ограничениях $g_j(x)$ в виде неравенств

$$\left. \begin{array}{l} f(x), \quad x \in E^n; \\ g(x) \geq 0, \quad j = 1, \dots, p, \end{array} \right\} \quad (1)$$

где E^n – допустимая область n -мерного пространства.

Оптимальным решением являться пара x^* и $f(x^*)$, состоящая из оптимальной точки $x^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]$ и соответствующего ей значения целевой функции $f(x^*)$

$$\left. \begin{array}{l} x^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*] \\ f_* = f(x^*) \end{array} \right\} \quad (2)$$

Известно, что для решения реальных практических оптимизационных задач, существующие классические методы оптимизации, как правило, не подходят. Нужны специальные методы, учитывающие специфику и характер целевых функций. В работе [6] разработан специальный метод оптимизации применительно к рассматриваемому классу задач. В основу разработанного алгоритма глобальной оптимизации заложен метод глобального случайного поиска – случайный мультистарт. Для предотвращения повторных спусков к точкам локальных минимумов в алгоритм глобальной оптимизации введена комбинация одного из пассивных методов покрытий (метода случайной сетки) с модифицированным методом туннельного алгоритма.

При разработке методов поиска локальных минимумов (внутренних процедур глобальной оптимизации) было учтено, что целевые функции имеют явно выраженный овражный характер. Исходя из этого, алгоритмы поиска локальных оптимумов создавались на базе комбинации методов локального спуска и способов овражного поиска.

Выбор методов локального спуска осуществлялся исходя из условия, что получение производных рассматриваемых целевых функций невозможно. Наиболее эффективными для решения подобных задач оказались методы Пауэлла и Нелдера-Мида.

Овражный поиск локального оптимума осуществлялся следующим образом. Организовывались два локальных спуска из близ лежащих начальных точек. Из каждой точки осуществлялись поиски промежуточных локальных минимумов $f_1^*(x_1^*)$ и $f_2^*(x_2^*)$. Затем находилось новое направление $s^{0(*)}$, проведенное из x_1^* в x_2^* (или наоборот, в зависимости от того, который из найденных промежуточных минимумов $f_1^*(x_1^*)$ или $f_2^*(x_2^*)$ больше), и вдоль него отыскивалось минимальное значение функции $f_{opt,loc}(x^*)$, которое и являлось локальным оптимумом.

Для решения задач минимизации целевой функции вида (1) с ограничениями в виде (2) используемые методы оптимизации сочетались с методом штрафных функций, что позволило свести задачу нелинейного программирования с ограничениями к эквивалентной последовательности задач без ограничений.

В общем случае такое преобразование осуществляется при помощи специальным образом сформированных [6] штрафных функций.

В целевые функции оптимизационных процессов $J = \sum_j m_j J_j$ входят основные показатели качества

выполнения маневров J_j со своими весовыми вкладками m_j . При этом возникает ряд существенных проблем. Одна из них связана с экспертными оценками весовых вкладок и масштабированием показателей качества. Вторая проблема обусловлена большим количеством критериев, которые входят в целевые функции, что усложняет организацию самих вычислительных процедур и многократно увеличивает количество расчетов. Облегчить задачу, не ухудшив существенно результат ее решения, можно разделив показатели качества на две группы:

- старшую, характеризующие маневренные свойства электроходов, их экономичность и т.п. (т.е., характеризующие сам электроход, как систему более высокого уровня);

- младшую, характеризующую основные показатели качества работы гребной электрической установки электрохода на маневрах.

В соответствии с системным подходом, оптимизация должна проводиться сначала по показателям старшей группы, а затем, придерживаясь принципов "неухудшения" с учетом заданного допуска показателей старшей группы [7], по показателям младшей группы. К критериям старшей группы целесообразно отнести: продолжительность маневра – t_{man} , затраты энергии на его выполнение – W_{man} ; выбег судна – X_{man} . К показателям младшей группы относятся перечисленные выше показатели ГЭУ. Из второй группы показателей целесообразно (с учетом того, что ГЭУ работает в составе всей судовой электроэнергетической установки) выделить: продолжительность реверса гребных электродвигателей – t_{rev} ; электромагнитные потери в (ГЭД) – P_{em} ; продолжительность переходных процессов в СЭУ – $(t_{SEP})_{rev}$; максимальную мощность первичных двигателей – P_{Dm} ; отклонение скорости вращения первичных двигателей от установившегося режима – $\Delta\omega_D$.

На начальных этапах проектирования ГЭУ объем технической информации весьма ограничен. Отсутствует также информация и о большинстве параметров остальных составных частей пропульсивного комплекса, и о влиянии внешней среды. Для преодоления трудностей, связанные с многомерностью области оптимизируемого пространства E^n , были проведены серии расчетов [5] по одному из методов отсеивающих экспериментов. В результате удалось выявить те параметры, вклады которых в перечисленные показатели качества наиболее значимы. Это – обобщенные безразмерные параметры (критерии динамического

подобия) ГЭУ в составе пропульсивного комплекса электрохода:

$$C_{G7} = \frac{K_{GE} W_{GV}}{E_{G0}} \omega_{D0} I_{GV0};$$

$$C_{G8} = \frac{K_{GE} \omega_{D0}}{E_{G0}} \frac{m_G \sqrt{2}}{\pi} \frac{W_{G1} k_{GB}}{P_G} I_{G0};$$

$$C_{G10} = \frac{U_{G0}}{E_{G0}}; \quad C_{M17} = \frac{b_M^2}{(r'_{2M})^2};$$

$$C_{M16} = \frac{\beta_{M0}}{r_M'^2} \times \left[(b_M^2 + c_M^2 \alpha_0^2) + (d_M^2 + e_M^2 \alpha_0^2) \frac{r'_{2M}}{\beta_{M0}^2} + 2r_{1M} \alpha_0 \frac{r'_{2M}}{\beta_{M0}} \right];$$

$$C_{M18} = \frac{c_M^2}{r'_{2M}} \alpha_0^2; \quad C_{M20} = \frac{\omega_{M0}}{\omega_{Msn}}; \quad C_{M21} = d_M^2;$$

$$C_{M23} = 2 \frac{r_{1M}}{r'_{2M}} \alpha_0;$$

$$N_X = \frac{L P_{e0}}{(m + \lambda_{11}) v_0^2}; \quad N_M = \frac{M_{M0} L}{J_M \omega_{M0} v_0};$$

$$N_D = \frac{M_{D0} L}{J_D \omega_{D0} v_0},$$

где ω_{D0} – угловая скорость вращения первичного двигателя;

I_{GV0} – ток возбуждения синхронного генератора;

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

K_{GE} , m_G , W_{G1} , k_{GB} , P_G и W_{GV} – конструктивные параметры генератора;

E_{G0} – продольная составляющая результирующей ЭДС генератора;

ω_{M0} и ω_{Msn} – угловые скорости вращения двигателя и магнитного поля статора при номинальной частоте; β_{M0} – абсолютное скольжение ротора ГЭД;

α_0 – относительная частота питающего ГЭД напряжения;

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

P_{e0} – полезный суммарный упор гребных винтов;

L – длина судна;

M_{M0} и M_{D0} – вращающий момент ГЭД и первичного двигателя;

J_M и J_D – приведенные к валу ГЭД и к валу первичного двигателя моменты инерции вращающихся частей; (индекс "0" относится к базовому режиму, соответствующему движению судна по спокойной глубокой воде с номинальной мощностью двигателей);

c_{DR} – статизм регуляторных характеристик первичных двигателей;

$k2$ – коэффициент, характеризующий скорость изменения напряжения гребных электродвигателей при торможении.

Вклады (в процентах) этих параметров в перечисленные показатели качества приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Вклады (в %) значимых безразмерных параметров в показатели качества маневрирования

Безразмерные параметры	Показатели качества маневрирования						
	t_{man}	W_{man}	X_{man}	$\Delta\omega_D$	P_{Dm}	t_{Mrev}	$(t_{SEP})_{rev}$
N_X	38,4	26,6	29	–	–	14,7	13,4
C_{M16}	28,7	10,7	26,3	13,8	27,6	22,5	18,7
C_{M20}	12,9	11,3	21,5	–	13,6	17,5	7,4
C_{M18}	5,9	6,3	–	–	–	–	–
C_{M23}	3,3	C_{M17}	19,3	–	17,8	–	–
C_{M17}	C_{M17}	16,5	–	14	15,3	–	7,4
C_{G7}	2,5	–	–	–	20,5	29,8	7,4
C_{M21}	–	1,7	–	–	–	–	–
N_M	–	–	3,5	–	–	–	–
N_D	–	–	–	26	–	–	9,3
c_{DP}	–	–	–	25,4	–	–	–
C_{G8}	–	–	–	13,3	–	10,6	–
C_{G10}	–	–	–	6,3	–	–	–
$k2$	–	–	–	–	–	–	34,4

Именно эти безразмерные параметры гребной электрической установки, работающей в составе единого судового пропульсивного комплекса, и подлежат параметрической оптимизации.

Результаты исследований. В качестве примера использования рассмотренного выше подхода к параметрической оптимизации ГЭУ, ниже приведены результаты оптимизационных расчетов для выбранного выше электрохода "Прототип".

На первом этапе оптимизация параметров гребной электрической установки проводилась по показателям качества старшей группы. Критериями оптимальности выбраны продолжительность маневра t_{man} и затраты энергии на его выполнение W_{man} со своими весовыми коэффициентами, соответственно m_t и m_W .

На втором этапе проводилось уточнение значений оптимизированных параметров уже по показателям младшей группы. Такая оптимизация, осуществленная с учетом "неухудшения" с заданным допуском показателей старшей группы, дает возможность, с одной стороны – улучшить показатели функционирования судовой электроэнергетической установки, с другой – не ухудшить (существенно) показатели качества старшей группы. Критериями оптимальности на втором этапе оптимизации выбраны продолжительность реверса ГЭД t_{Mrev} , максимальная мощность первичных двигателей P_{Dm} и отклонение скорости вращения первичных двигателей от установившегося режима $\Delta\omega_D$, со своими весовыми коэффициентами, соответственно m_{t1} , m_P и m_ω .

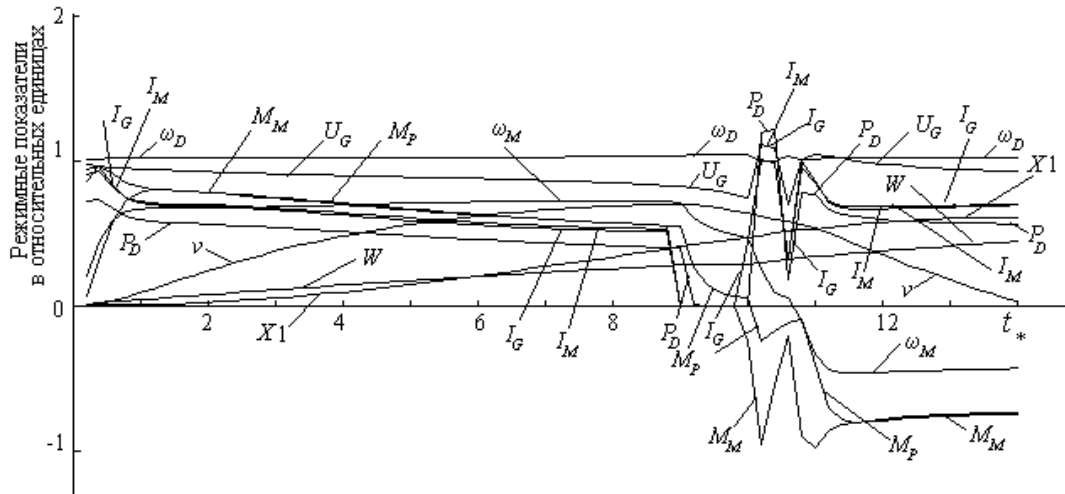


Рис. 3 – Текущие изменения режимных показателей оптимизированной ГЭУ

В процессе оптимизационных расчетов имеют место определенные трудности, связанные с назначением численных значений весовых коэффициентов. Соотношения между этими коэффициентами в каждом конкретном случае определяются целями оптимизации. Ниже приведены результаты параметрической оптимизации при соотношении вкладов $m_t = 0$ и $m_W = 1$ на первом ее этапе и $m_{t1} = 0$, $m_P = 0,25$, $m_{\omega} = 0,75$ на втором этапе. Такое соотношение продиктовано целью – минимум затрат энергии (топлива) на выполнение маневра и стабилизация угловой скорости вращения первичных двигателей. Оптимальные значения параметров приведены в соответствующей графе табл. 2.

Таблица 2 – Результаты параметрической оптимизации

Параметр	N_D	c_{DR}	C_{G7}	C_{G8}	N_X
"Прототип"	1,93 7	1,04	1,45	0,60 8	0,13 2
Оптимизированный вариант	3,5	1,03	1,81	1,1	0,2
Параметр	C_{M17}	C_{M18}	C_{M20}	C_{M23}	C_{M16}
"Прототип"	1,01 6	40,21	0,895	0,23 3	14,1 3
Оптимизированный вариант	0,5	5	0,9	1,6	8,1

Параметры C_{G10} , C_{M21} , N_M и $k2$ для сформированных выше целевых функций оказались незначимо влияющими. Результаты расчетов текущих значений режимных показателей уже оптимизированной ГЭУ в составе пропульсивного комплекса показаны на рис. 3.

Анализ численных значений основных показателей качества выполнения маневров (критериев, по которым строились целевые функции) показал следующее.

- затраты энергии на маневрирование уменьшились на 13%;
- продолжительность выполнения маневра возросла на 6%;

- отклонения частоты вращения первичных двигателей генераторных агрегатов снизились с 0,07 до 0,0466 о.е., т.е. на 33%;

- нагрузки на первичные двигатели генераторных агрегатов при реверсе уменьшились на 10%;

- продолжительность реверса гребных электродвигателей возросла на 3%.

Как видно, три показателя качества (затраты энергии на выполнение маневра; нагрузки на тепловые двигатели, отклонения частоты вращения) улучшились, а два (продолжительность выполнения маневра и продолжительность реверса ГЭД) ухудшились. Этот результат полностью соответствует поставленной оптимизационной задаче. Эффективность (в соответствии со сформированными целевыми функциями) работы электрохода в результате оптимизации существенно повысилась. Одновременно с этим, как видно из сравнения рис. 2 и рис. 3, у комплекса с оптимально спроектированной гребной электрической установкой переходные процессы протекают существенно "мягче".

Выводы.

1. Системный подход к вопросам проектирования гребных электрических установок судов с электродвижением открывает пути повышения эффективности работы электроходов на маневрах. Появляются возможности уже на самых ранних этапах проектирования прогнозировать маневренные свойства проектируемых электроходов и находить способы их улучшения.

2. Предложен метод поиска оптимальных решений, позволяющий решать задачи параметрической оптимизации гребных электрических установок, как составных частей судовых электромеханических систем.

3. Процедуру параметрической оптимизации целесообразно проводить в два этапа: сначала по показателям качества электрохода, как старшей системы, а затем по показателям ГЭУ.

Список литературы: 1. Небеснов В. И. Вопросы совместной работы двигателей винтов и корпуса судна. / В.И. Небеснов – Л. : Судостроение, 1965. – 247с. 2. Флацбаум Д. И. Методы выбора варианта судовых ЭЭС на основании комплексных технико-экономических

оценок / Д. И. Флацбаум // Судостроительная промышленность. Сер. Судовая электротехника и связь. – 1989. – Вып.10. – С. 3 – 11.
3. Горбунов Б.А. Современные и перспективные гребные электрические установки судов / Б.А. Горбунов, А.С. Савин В.В., В.В. Сержантов – Л. : Судостроение, 1979. – 180с.
4. Яровенко В. А. Математическая модель переходных режимов работы силовых установок электроходов / В. А. Яровенко // Зб. наук. пр. УДМТУ. – Миколаїв : УДМТУ, 1999. – №4 (364). – С. 44 – 54.
5. Яровенко В. А. Влияние параметров пропульсивных комплексов на показатели качества работы силовых установок электроходов на маневрах / В. А. Яровенко // Зб. наук. пр. УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 1999. – №3 (363). – С. 79 – 87. 6. Яровенко В. А. Методы поиска оптимальных решений при проектировании энергетических установок электроходов / В. А. Яровенко // Зб. наук. пр. УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 2000. – №1 (367). – С. 29 – 36. 7. Батищев Д. И. Методы оптимального проектирования / Д. И. Батищев – М.: Радио и связь, 1984. – 248с.

1965. Print. 2. Flacbaum, D.I. "Metody vybora varianta sudovyh JES na osnovanii kompleksnyh tehniko-jekonomicheskikh ocenok." *Sudostroitel'naja promyshlennost' Ser.: Sudovaja jelectrotehnika i svjaz'* (1989): 3–11. Print. 3. Gorbunov, B. A., A. S. Savin and V. V. Serzhantov. "Sovremennye i perspektivnye grebnye jelectricheskie ustanovki sudov." Leningrad. Sudostroenie, 1979. 4. Jarovenko, V. A. "Matematicheskaja model' perehodnyh rezhimov raboty silovyh ustanovok jelectrohodov." *Zb. nauk. pr. UDMTU. Mykolayiv: UDMTU.* No 4 (364). 1999. 44–54. Print. 5. Jarovenko, V.A. "Vlijanie parametrov propul'sivnyh kompleksov na pokazateli kachestva raboty silovyh ustanovok jelectrohodov na manevrah." *Zb. nauk. pr. UDMTU. Mykolayiv: UDMTU.* No 3 (363). 1999. 79 – 87. Print. 6. Jarovenko, V. A. "Metody poiska optimal'nyh reshenij pri proektirovanii jenergeticheskikh ustanovok jelectrohodov." *Zb. nauk. pr. UDMTU. Mykolayiv: UDMTU.* No 1 (367). 2000. 29 – 36. Print. 7. Batishev, D. I. *Metody optimal'nogo proektirovanija.* Moskva. Radio i svjaz', 1984. Print.

Bibliography (transliterated): 1. Nebesnov, V. I. "Voprosy sovmestnoj raboty dvigatelej vintov i korpusa sudna." Lenindrad: Sudostroenie,

Поступила (received) 24 .04.2015

«Сведения об авторах / About the Authors»

Яровенко Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор, Одесский национальный морской университет, заведующий кафедры электротехники и электрооборудования судов, тел.: +38(044) 454-95-18; e-mail: svf46@voliacable.com.

Jarovenko Vladimir Alekseevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Odessa National Maritime University, Chair of the Department of Electrical Engineering and Electrical Ships, phone +38(044) 454-95-18; e-mail: svf46@voliacable.com.

Зарицкая Елена Игоревна – кандидат технических наук, Одесский национальный морской университет, старший преподаватель кафедры электротехники и электрооборудования судов; e-mail: zarickayalena74@mail.ru

Zarickaya Elena Igorevna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Odessa National Maritime University, Senior Lecturer of the Department of Electrical Engineering and Electrical Ships; e-mail: zarickayalena74@mail.ru