

УДК 629.12-8:629.12.037

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ВОПРОСАМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЭУ

В. А. Яровенко¹

Предложен системный подход к проектированию гребных энергетических установок. ГЭУ проектируется по показателям качества работы судна, как старшей системы. Разработана процедура поиска оптимальных решений при проектировании и поисках оптимальных законов управления ГЭУ.

Ключевые слова: гребные энергетические установки, поиск оптимальных решений, поиск оптимальных законов управления ГЭУ.

Системный подход к вопросам проектирования сложных иерархических систем, каковыми являются судовые пропульсивные комплексы, предполагает такое построение младшей системы, которое в первую очередь будет в наибольшей степени отвечать требованиям старшей системы, для обеспечения функционирования которой она предназначена. В соответствии с этим, сравнительные оценки качества проектирования судовых энергетических установок (СЭУ) должны проводиться, прежде всего, по критериям судна. Разработка стратегии поиска оптимальных решений при проектировании СЭУ электроходов и **является целью настоящей работы.**

Оптимальное проектирование судовых энергетических установок предполагает решение двух основных задач, объединяющих вопросы:

- а) "конструктивного" проектирования энергетических установок как составных элементов пропульсивных комплексов электроходов;
- б) оптимального управления энергетическими установками.

Энергетическая установка электрохода представляет сложную электромеханическую систему, входящую в состав судового пропульсивного комплекса. Структурная схема комплекса представлена на рис. 1.

В состав каждого его энергетического 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.

¹ © Яровенко В.А., д.т.н., проф., зав. кафедрой «Электротехника и электрооборудование судов», ОНМУ.

Важнейшими показателями качества проектирования СЭУ, являются маневренные свойства электроходов. В настоящей работе рассмотрены некоторые вопросы системного подхода к проектированию энергетических установок с точки зрения обеспечения ими высоких маневренных свойств электроходов.

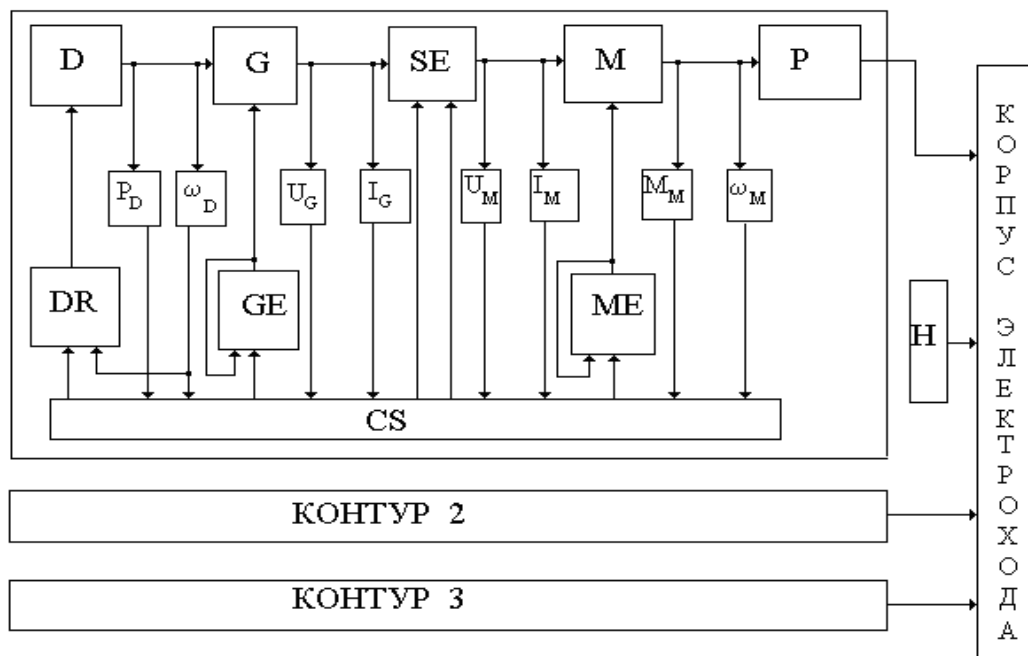


Рис. 1. Структурная схема импульсного комплекса электрохода

На основе структурной схемы (рис. 1) разработана математическая модель переходных режимов работы СЭУ. Она приведена в работе [3]. С помощью модели и разработанного на ее основе метода расчета можно рассчитывать текущие значения режимных показателей комплекса по ходу выполнения маневров и оценивать основные показатели качества маневрирования. В соответствии с системным подходом, к таким показателям относятся, в первую очередь, показатели, характеризующим безопасность маневрирования и экономические показатели выполнения маневренных операций. Это, в частности: продолжительность выполнения маневра T и отдельных его этапов; пройденный судном путь X ; относительные затраты топлива на выполнение маневра G ; электромагнитные потери в гребных электродвигателях (ГЭД) $A_{эм}$.

Комплексная оценка качества проектирования судовых энергетических установок предполагает проведение многокритериальной оптимиза-

ции. По своей постановке эти задачи относятся к области нелинейного программирования и заключаются в отыскании экстремумов мультимодальных целевых функции $f(x)$ при заданных ограничениях $g_j(x)$ в виде неравенств

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

В работе [4] разработан специальный метод оптимизации применительно к рассматриваемому классу задач. В соответствии с ним, в целевые функции оптимизационных процессов $J = \sum_j m_j J_j$ должны входить ос-

новные показатели качества выполнения маневров J_j со своими весовыми вкладами m_j .

Обычно в таких случаях возникает ряд существенных проблем, связанных с экспертными оценками весовых вкладов показателей качества в целевую функцию. Облегчить задачу, не ухудшив существенно результат ее решения, можно разделив показатели качества на две группы:

а) старшую, к которой относятся показатели, характеризующие судно (как систему более высокого уровня) а именно, его маневренные свойства, экономичность и т.п.;

б) младшую, характеризующую маневренные свойства энергетической установки, ее составных частей, качество протекания переходных процессов в составных частях СЭУ.

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, по показателям младшей группы. К критериям старшей группы целесообразно отнести: продолжительность маневра – T_{\min} , затраты топлива на его выполнение – G_{\min} , выбег судна – $X1_{\min}$. К показателям младшей группы можно отнести: продолжительность переходных процессов в СЭУ – $T_{\text{СЭУрев}}$, максимальную мощность первичных двигателей – $P_{D\max}$, отклонение скорости вращения первичных двигателей от установившегося режима – $\Delta\omega_D$, электромагнитные потери в гребных электродвигателях (ГЭД) – A_{\min} , продолжительность реверса гребных винтов – $T_{\text{ГЭДрев}}$.

При решении задач первого класса – параметрической оптимизации пропульсивного комплекса электрохода – возникают дополнительные трудности, связанные с многомерностью области оптимизируемого пространства E^n . Число параметров n , влияющих на показатели качества маневрирования, исчисляется сотнями. Сократить их количество до нескольких десятков удастся за счет перевода уравнений математической модели к системе безразмерных единиц и выделения обобщенных безразмерных параметров (критериев подобия) пропульсивного комплекса. Однако и после этой процедуры, число параметров остается слишком большим. Таким об-

разом, возникает задача выявить из множества параметров $q_i, i=1, \dots, n$ подмножество параметров p ($p < n$), отклонение которых от расчетных значений Δq_j определяет основную часть приращения показателя $J(\Delta q_j) \approx J(\Delta q_i)$. Именно эти параметры подлежат оптимизации. Разброс остальных $s = n - p$ параметров не оказывает существенного влияния на исследуемый показатель качества и их значения целесообразно принять неварьируемыми.

Решение этой задачи проводится методами отсеивающих экспериментов. При числе факторов, исчисляемом несколькими десятками, удобно воспользоваться методом случайного баланса. Он позволяет по каждому показателю качества выполнения маневра выявить значимые параметры и эффекты взаимодействий параметров. Такие исследования применительно к основным маневрам электроходов – разгону, торможению, реверсу, выходу на циркуляцию представлены в работе [5]. Показано, что для каждого показателя качества имеется своя совокупность значимых параметров. Комплексный анализ степени их влияния позволил выявить, вклады которых в исследуемые показатели качества наиболее существенны. К ним относятся:

$$C_{G7} = \frac{K_{GE} W_{GV}}{E_{G0}} \omega_{D0} I_{GV0}; \quad C_{G8} = \frac{K_{GE} \omega_{D0}}{E_{G0}} \frac{m_G \sqrt{2}}{\pi} \frac{W_{G1} k_{GB}}{p_G} I_{G0};$$

$$C_{G10} = \frac{U_{G0}}{E_{G0}};$$

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

$$C_{M17} = \frac{b_M^2}{(r_{2M}')^2};$$

$$C_{M18} = \frac{c_M^2}{r_{2M}'^2} \alpha_0^2; \quad C_{M20} = \frac{\omega_{M0}}{\omega_{1MH}}; \quad C_{M21} = d_M^2; \quad C_{M23} = 2 \frac{r_{1M}}{r_{2M}'} \alpha_0;$$

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

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_{1Mn} – угловые скорости вращения двигателя и магнитного поля статора при номинальной частоте; β_{M0} – абсолютное скольжение ротора ГЭД; 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 и λ_{11} – масса судна и присоединенные массы воды вдоль его продольной оси; P_{e0} – полезный суммарный упор гребных винтов; L – длина судна; M_{D0}, M_{M0} – вращающий момент первичного двигателя и ГЭД; J_D, J_M – приведенные к валу первичного двигателя и к валу ГЭД моменты инерции вращающихся частей (индекс “0” относится к базовому режиму работы, соответствующему движению судна с номинальной мощностью двигателей);

c_{DP} – статизм регуляторной характеристики первичных двигателей;

k_2 – коэффициент, характеризующий скорость нарастания напряжения гребных электродвигателей при торможении.

Вклады этих параметры в показатели качества приведены в табл. 1.

Таблица 1

Вклады значимых параметров в показатели качества маневрирования

Параметр	Вклад в показатели качества, %						
	T_{\min}	G_{\min}	$X1_{\min}$	$\Delta\omega_D$	$P_{D \max}$	$T_{ГЭДрев}$	$T_{СЭУрев}$
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	-	-	-
C_{M38}	-	-	-	-	-	9,8	-
k_2	-	-	-	-	-	-	34,4

Вклады значимых факторов и взаимодействий могут быть представлены в виде аналитических зависимостей или в виде гистограмм. В качестве примера, на рис. 2 приведены гистограммы с вкладами наиболее существенных параметров на показатели качества выполнения маневров $T(a)$, G (б) и $\Delta\omega_D(b)$.

Гистограмма с вкладками (в %) значимых факторов и взаимодействий в показатель качества T приведена на рис. 1, а. Факторы здесь соответствуют безразмерным параметрам и эффектам взаимодействий параметров: 1 - N_X ; 2 - C_{M16} ; 3 - N_M ; 4 - $C_{M23} \cdot N_X$; 5 - C_{M23} ; 6 - $N_M N_X$.

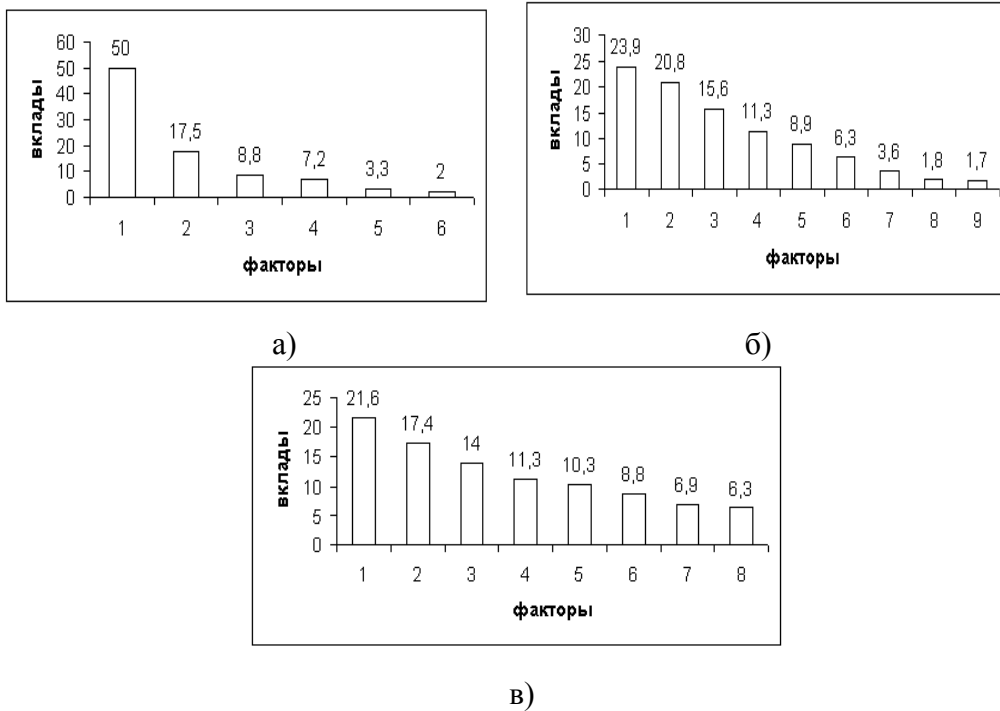


Рис. 2. Вклады параметров и эффектов в показатели T (а), W (б) и $\Delta\omega_D$ (в)

Гистограммы с вкладками значимых параметров и эффектов в показатели качества W и $\Delta\omega_D$ приведены соответственно на рис. 1б и рис. 1в.

Представленное на рис. 1б влияние факторов на показатель W учитывает:

- 1- N_X ; 2- C_{M23} ; 3- C_{M17} ; 4- C_{M20} ; 5- C_{M16} ;
6- C_{M18} ; 7- $N_X \cdot C_{M16}$; 8- $N_X \cdot C_{M17}$; 9- C_{M21} .

Отмеченные на рис. 1, в факторы и взаимодействия соответствуют:

- 1- N_D ; 2- c_{DR} ; 3- C_{G7} ; 4- C_{G8} ; 5- C_{M16} ;
6- $N_D \cdot c_{DR}$; 7- $c_{DR} \cdot C_{M16}$; 8- C_{G10} .

При оптимизации по показателям качества старшей группы к критериям оптимальности имеет смысл отнести продолжительность маневра T_{\min}

и затраты топлива на его выполнение G_{\min} . Поиск оптимальных параметров следует осуществлять по многокритериальной целевой функции

$$J_{TG} = m_T T + m_G G,$$

где m_T и m_G – весовые коэффициенты соответствующих показателей.

В ходе параметрической оптимизации приходится постоянно сталкиваться с необходимостью проведения неформальных процедур. К основным причинам этого относятся следующие:

1. На оптимальное решение оказывает влияние соотношение весовых коэффициентов m_T и m_G . Это соотношение заранее, как правило, неизвестно и в каждом конкретном случае выбирается в зависимости от поставленной цели.

2. Оптимизация по отдельным маневрам дает разные результаты.

В результате, приходится принимать компромиссные решения в большей или в меньшей степени, удовлетворяющие поставленной цели. Результаты таких оптимизационных расчетов, проведенных для различных соотношений между весовыми коэффициентами m_T и m_G , приведены, в частности, в работе [6] и могут быть использованы при параметрической оптимизации пропульсивных комплексов электроходов.

Уточнить значения оптимизированных параметров можно по показателям младшей группы. Такая оптимизация, осуществленная с учетом "неухудшения" с заданным допуском показателей старшей группы дает возможность, с одной стороны – улучшить показатели функционирования энергетической установки, с другой – не ухудшить существенно показатели качества старшей группы. Поиск оптимальных параметров в этом случае целесообразно осуществлять по многокритериальной целевой функции типа

$$J_{TP\omega} = m_T T_{\text{рев}} + m_P P_D + m_{\omega} \omega_D.$$

Окончательные значения оптимальных параметров пропульсивных комплексов, полученные в результате поэтапной параметрической оптимизации проведенной, в соответствии с предлагаемой методикой, сначала по критериям старшей, а затем – младшей групп (с учетом принятой степени значимости показателей качества) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Оптимальные параметры пропульсивных комплексов электроходов

Параметры комплекса	Диапазоны изменения	Оптимизация параметров по критериям		Оптимальные параметры
		J_{TG}	$J_{\omega PT}$	
N_X	0,06 – 0,20	0,2	0,2	0,2
C_{M23}	0,8 - 1,6	1,6	1,6	1,6

C_{M16}	4 – 14	7 - 9	8,1	8,1
C_{M20}	0,6 – 0,9	0,6-0,9	0,894	0,9
C_{M18}	1 - 9	5	5,85	5
C_{M17}	0,2 – 0,8	0,2-0,8	0,785	0,5
C_{G7}	1,5 – 1,9	1,55-1,81	1,81	1,81
C_{G8}	0,86 – 1,35	0,86-1,35	1,338	1,1
N_D	1 - 6	1 - 6	4	3,5
c_{DR}	1,035-1,065	1,035- 1,065	1,039	1,04
C_{M22}	1,05 – 1,21	1,1	1,1	1,1

В табл. 3 проиллюстрированы результаты параметрической оптимизации на примере проекта конкретного электрохода, условно названного "Проектом". За прототип взято судно "Капитан Измайлов". В качестве гребной электрической установки принята ГЭУ на основе частотно-управляемых гребных электродвигателей. Оптимизация по показателям старшей группы проведена для соотношения весовых вкладов $m_T = 0$ и $m_G = 1$. Оптимизация по показателям младшей группы выполнена по многокритериальной целевой функции $J_{TP\omega} = m_T T_{рев} + m_P P_D + m_\omega \omega_D$ при соотношении весовых вкладов $m_\omega = 0,75$, $m_P = 0,25$, $m_T = 0$. Оптимальные значения параметров приведены в соответственной графе табл. 3.

Таблица 3

Оптимизируемые параметры пропульсивного комплекса "Проект"

Параметр	Значения параметров		Параметр	Значения параметров	
	"Проект"	Оптимальные		"Проект"	Оптимальные
N_D	1,937	3,5	C_{M17}	1,016	0,5
c_{DR}	1,04	1,04	C_{M18}	40,21	5
C_{G7}	1,45	1,81	C_{M20}	0,895	0,9
C_{G8}	0,608	1,1	C_{M22}	1,12	1,1
N_X	0,132	0,2	C_{M23}	0,233	1,6
C_{M16}	14,127	8,1	C_{M24}	12	5,55

Результаты проведенных затем расчетов текущих (по ходу выполнения маневров) значений режимных показателей и оценки основных показателей качества маневрирования "оптимизированного" электрохода показали, что:

- затраты топлива на выполнение маневра уменьшились на 12,7 %;
- продолжительность выполнения маневра возросла на 6 %;
- отклонения частоты вращения снизились с 0,07 до 0,0466 о.е., т.е. на 33,4 %;
- нагрузки на тепловые двигатели при реверсе уменьшились на 10,2 %;

– продолжительность реверса ГЭД возросла на 3,1 %.

Как видно, три показателя качества улучшились, а два – T и $T_{\text{рев.ГЭД}}$ – ухудшились. Это полностью соответствует целевым функциям поставленной оптимизационной задачи. Эффективность работы электрохода в результате оптимизации существенно повысилась. Кроме того, как показали расчеты, у комплекса с оптимально спроектированной энергетической установкой переходные процессы протекают “мягче”.

Решение второй группы задач – поиски оптимальных законов управления СЭУ целесообразно осуществлять применительно к уже конструктивно оптимизированному пропульсивному комплексу. В то же время, полезными будут рекомендации по поиску наилучших законов управления и для уже существующих электроходов.

Применительно к гребным энергетическим установкам с частотно-регулируемыми ГЭД в ряде работ, в частности [1, 2], предлагаются оптимальные законы управления, заимствованные из теории частотного управления общепромышленных электроприводов. Однако, следует помнить, что рекомендуемый при этом пропорциональный оптимальный закон управления $\left(\gamma/\alpha = \text{const}\right)$ получен [1] применительно к “электрическим”

показателям качества работы электродвигателей. При системном подходе эти показатели отходят на второй план. Следовательно, возникает необходимость в поисках тех законов управления, которые обеспечат наилучшие значения показателей качества судна, как старшей системы. Такими показателями могут быть, как и при параметрической оптимизации, продолжительность маневра – T_{min} , затраты топлива на его выполнение – G_{min} , выбег судна – $X1_{\text{min}}$. Поиски оптимальных законов управления можно осуществлять теми же методами, что и при параметрической оптимизации.

В работе [7] рассмотрено, в качестве примера, оптимальное управление энергетическими установками с частотно-регулируемыми ГЭД при разгоне судна, торможении, реверсе, движении по криволинейной траектории. Для судов с единой судовой электроэнергетической системой управляющие сигналы предложено формировать в виде

$$\alpha = \alpha_{\text{уст}} (1 - e^{-k_4 T});$$

$$\gamma = k_1 \alpha + k_2 \alpha^2 + k_3 \alpha^3,$$

при

$$\psi = \psi_0 + k_5 (\Delta \psi),$$

где $\alpha_{\text{уст}}$ – установившееся значение относительной частоты напряжения ГЭД; ψ , ψ_0 и $\Delta \psi$ – степень затяжки пружины регулятора скорости первичного двигателя, ее базовое значение и приращение ψ ; $T = v_0 t / L$ – безраз-

мерное время; t – текущее время; k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 – оптимизируемые коэффициенты.

Анализ результатов оптимизационных расчетов показывает, что выбор критерия оптимальности существенно влияет на оптимальные законы управления. Степень влияния изменения критерия оптимальности на оптимальные законы управления оценим на примере одного из характерных маневров электроходов – разгона. На рис. 3а представлены результаты оптимизационных расчетов по критерию минимума продолжительности маневра – $T_{м.мин}$, на рис. 3б – минимума затрат топлива на его выполнения – $G_{м.мин}$ а на рис. 3в – минимума электромагнитных потерь в гребных электродвигателях – $A_{эм.мин}$.

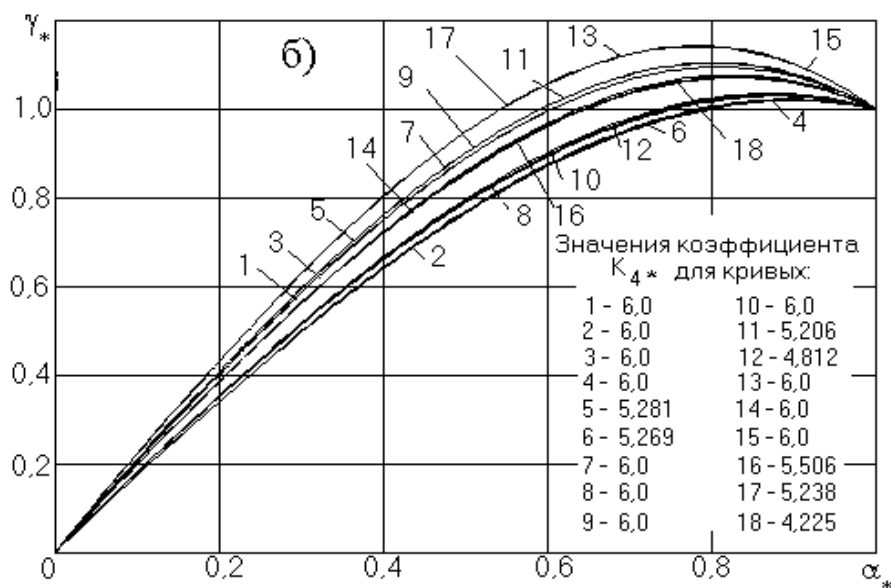


Рис. 3,а. Оптимальные законы управления по критерию $T_{м.мин}$

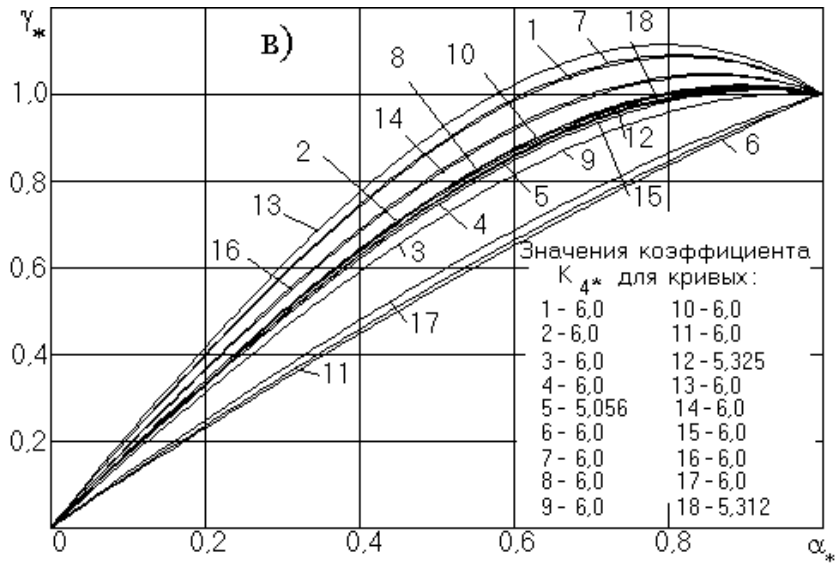


Рис. 3, б. Оптимальные законы управления по критерию $G_{m.min}$

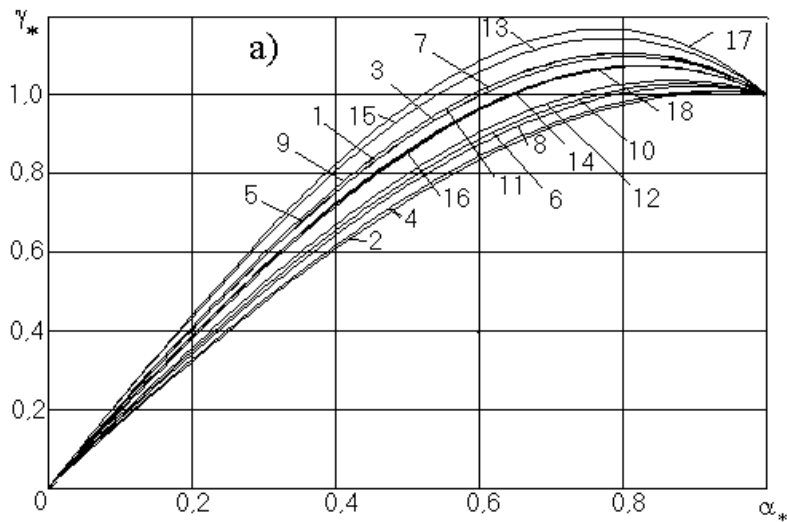


Рис. 3, в. Оптимальные законы управления по критерию $A_{3m.min}$

Приведенные на рисунках результаты – оптимальные значения коэффициента k_{4*} закона изменения относительной частоты $\alpha_* = \alpha(t)$ и построенные по $k_{1*} \dots k_{3*}$ оптимальные законы изменения относительного напряжения $\gamma_* = \gamma(\alpha_*)$ – получены для различных соотношений обобщенных параметров (критериев динамического подобия) пропульсивных ком-

плексов электроходов C_{G7} и C_{M16} , оказывающих (как показали проведенные исследования) наибольшее влияние на оптимальные законы управления.

Анализ полученных результатов показывает, что с переходом от одного критерия оптимальности к другому оптимальные законы управления изменяются. Возникает вопрос, насколько при оптимизации по одному из рассматриваемых критериев ухудшаются значения остальных. Иными словами, есть ли целесообразность изменять законы управления при смене критерия оптимизации, или можно выработать некоторый единый "усредненный" закон управления, обеспечивающий приемлемые значения показателей качества.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующий вывод.

С изменением критерия оптимизации изменяются и оптимальные законы управления и значения целевых функций. При этом явно отмечается ухудшение значений тех показателей качества, которые не входят в целевую функцию. Переход от "электрического" показателя к показателям, характеризующим энергетическую установку и судно, сопровождается существенным ухудшением "первого". И наоборот. В то же время, отличие в оптимальных решениях по критериям $T_{m.min}$ и $G_{m.min}$ существенно меньше, чем по критерию $A_{эм.min}$. Оно находится в диапазоне 6 - 8 %. Это является обнадеживающим выводом: оптимальные с точки зрения минимума продолжительности выполнения разгона и затрат топлива на его выполнение законы управления СЭУ близки (с допуском по неухудшению этих показателей до 10 %). При этом следует отметить, что эти законы существенно отличаются от рекомендуемых законов управления [1, 2], ориентированных на "электрические" показатели. Сокращение же продолжительности выполнения маневра и относительных затрат топлива может достигать при этом 25-35 %.

Выводы

1. Системный подход к вопросам проектирования и управления гребными энергетическими установками судов с электродвижением открывает широкие возможности повышения эффективности работы пропульсивных комплексов на маневрах.
2. Процедуру параметрической оптимизации следует проводить в два этапа: сначала по показателям качества судна, как старшей системы, а затем по показателям качества СЭУ.
3. Оптимальные законы управления гребными энергетическими установками судов с электродвижением должны назначаться в отдельности по каждому маневру в зависимости от целевой функции и в соответствии с параметрами судовых пропульсивных комплексов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными электродвигателями. – М.: Наука, 1966. – 282 с.
2. Горбунов Б. А., Савин А. С., Сержантов В. В. Современные и перспективные гребные электрические установки судов. – Л.: Судостроение, 1979. – 180 с.
3. Яровенко В. А. Математическая модель переходных режимов работы силовых установок электроходов // Зб. наук. пр. УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 1999. - № 4 (364). - С. 44-54.
4. Яровенко В. А. Методы поиска оптимальных решений при проектировании энергетических установок электроходов // Зб. наук. пр. УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 2000. - № 1 (367). - С. 29-36.
5. Яровенко В. А. Влияние параметров пропульсивных комплексов на показатели качества работы силовых установок электроходов на маневрах // Зб. наук. пр. УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 1999. – № 3 (363). – С. 79-87.
6. Яровенко В. А. Оптимизация параметров силовых установок пропульсивных комплексов электроходов // Судовые энергетические установки. – Одесса: ОГМА, 1999. – № 3. – С. 3-7.
7. Яровенко В.А. Расчет и оптимизация переходных режимов пропульсивных комплексов электроходов. – Одесса: Маяк, 1999. – 188 с.

Рукопись поступила в редакцию 28.04.2013 г.