

УДК 629.12-8:629.12.037

В.А. Яровенко, Е.И. Зарицкая

**СПОСОБ ОЦЕНКИ НАГРУЗОК
НА ГРЕБНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ
ЭЛЕКТРОХОДОВ ПРИ ЦИРКУЛЯЦИОННОМ ДВИЖЕНИИ**

Предложен способ оценки нагрузок на гребные электрические установки (ГЭУ) при совместном маневрировании рулем и винтами на криволинейной траектории. Разработаны полиномиальные модели для расчета основных показателей качества работы составных частей ГЭУ. Погрешности расчетов находятся в допустимых пределах.

Ключевые слова: гребные электрические установки, маневрирование электроходов, расчет нагрузок.

Запропоновано спосіб оцінки навантажень на гребні електричні установки (ГЕУ) при спільному маневруванні кермом і гвинтами на криволінійній траєкторії. Розроблено поліноміальні моделі щодо розрахунку основних показників якості роботи складових частин ГЕУ. Похибки розрахунків знаходяться у допустимих межах.

Ключові слова: гребні електричні установки, маневрування електроходів, розрахунок навантажень.

Method for assessing loads on electrical propelling plants during joint maneuvers with rudder and screws on a curved trajectory was provided. Polynomial models for calculating main quality indices of operation of propelling plants' components were developed. Error calculations are within acceptable limits.

Keywords: propelling electric plants, electric ships' maneuvering, calculation of loads.

Актуальность задачи. Важнейшими показателями качества работы судов с электродвижением являются их маневренные свойства. Они напрямую зависят от эффективности работы гребных электрических установок (ГЭУ). При движении по криволинейной траектории повышение маневренных свойств электроходов достигается за счет совместного управления гребной электрической установкой и рулем. Правильному выбору системы электродвижения, качественному ее проектированию, определению наилучших законов управления ГЭУ (с точки зрения обеспечения электроходам наилучших маневренных свойств) уделяется особое внимание.

Однако, как показали исследования, при выходе судна на криволинейную траекторию происходит существенное изменение нагрузок на внутренние и внешние (относительно центра циркуляции) силовые кон-

туры – на гребные электродвигатели (ГЭД), генераторы электрического тока и тепловые двигатели гребной электрической установки. Часто маневрирование осуществляется на воде конечной глубины, что не может не сказываться на режимах работы всех элементов судовой энергетической установки. Получение способа оценки нагрузок на гребные электрические установки при совместном маневрировании рулем и винтами на криволинейной траектории движения судна и является **целью настоящей работы**.

Изложение основного материала. Гребная электрическая установка входит составной частью в единый судовой пропульсивный комплекс, поэтому оценивать качество ее работы можно лишь в единстве со всеми частями этого комплекса. В основу расчета основных режимных показателей и нагрузок на элементы ГЭУ положена математическая модель переходных режимов их работы, предложенная в [2]. Модель получена на базе обобщенной структурной схемы пропульсивных комплексов электроходов, представленной на рис.1. В состав каждого силового контура ГЭУ входят: первичные двигатели ПД, генераторы электрического тока СГ, преобразователи электроэнергии ПЭ, гребные электродвигатели ГЭД, возбудители генераторов ВГ и электродвигателей ВД и гребные винты. Кроме того, пропульсивный комплекс электрохода включает в себя гребные винты ВГ, руль и корпус судна.

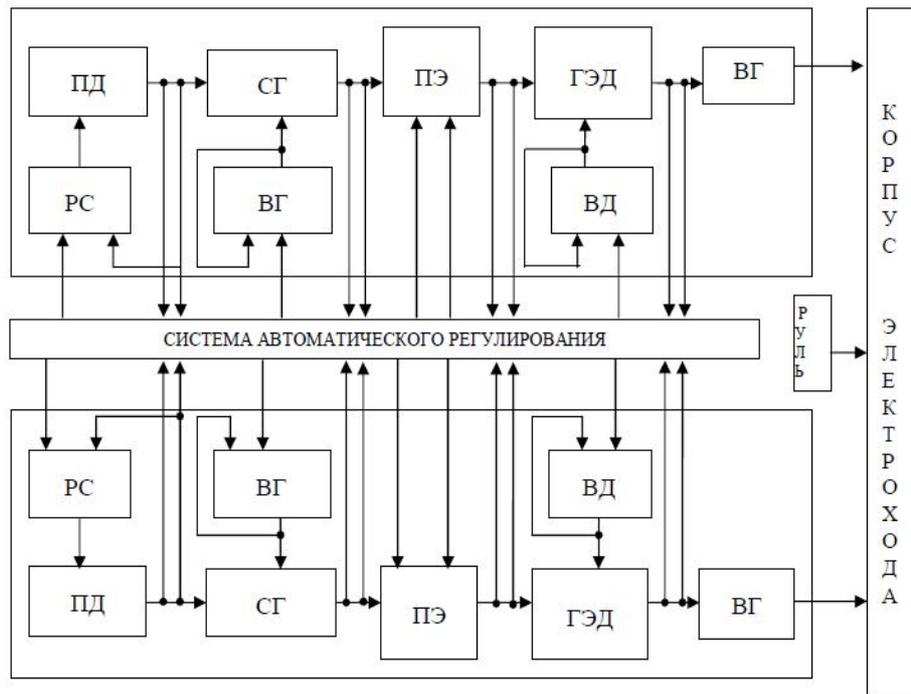


Рис. 1. Структурная схема пропульсивного комплекса электрохода

С помощью математической модели и разработанного на ее основе метода расчета можно отыскивать текущие значения режимных показателей по ходу выполнения маневров. В частности, применительно к ГЭУ, это: угловая скорость вращения ω_D , вращающий момент M_D и мощность P_D первичных двигателей; напряжение U_G и ток I_G генераторов; напряжение U_M и ток I_M гребных электродвигателей; вращающий момент M_M и угловая скорость вращения ω_M ГЭД; относительные затраты топлива на выполнение маневра G ; момент сопротивления M_P и упор P_P гребных винтов.

На рис. 2, в качестве примера, показаны текущие (в безразмерном времени) значения режимных показателей при выполнении судном маневра "разгон-выход на циркуляцию".

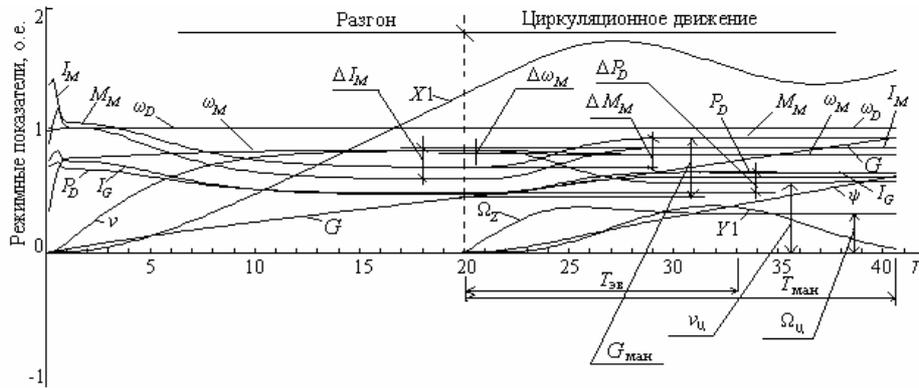


Рис. 2. Режимные показатели при выходе судна на циркуляцию

Разработанный [2] математический аппарат позволяет достаточно точно оценивать значения режимных показателей в наиболее характерные моменты времени, на самых ответственных этапах маневров. Это – не что иное, как показатели качества работы гребных электрических установок на маневрах. Однако, на ранних стадиях проектных разработок, при условии ограниченного объема технической информации о рассматриваемом объекте, для оценки нагрузок на элементы ГЭУ нужны простые, наглядные, не требующие громоздких вычислительных процедур методы расчета. Для решения подобных задач широко используются аналитические методы, основанные на представлении численных значений показателей качества приближенными аналитическими моделями. В ряде работ [1, 2] предложено рассчитывать такие показатели с помощью полиномиальных моделей. Эти модели представляют собой приближенные аналитические зависимости показателей качества J от параметров пропульсивного комплекса электрохода. При установлении связей показателей J с параметрами пропульсивного комплекса q_i используется прием адекватного пред-

ставлення $J = J(q_1, q_2, \dots, q_n)$ некоторой приближенной аналитической моделью $J^* = J^*(q_1, q_2, \dots, q_n)$. Наибольшее применение при построении таких аналитических моделей получило многочленное приближение $J^*(\mathbf{B}, \mathbf{q})$, где \mathbf{B} – вектор коэффициентов приближенного полинома. Для анализа судовых электроэнергетических систем достаточно [1] ограничиться представлением показателей J^* полиномами первого (1) или второго (2) порядков

$$J^* = \sum_{i=0}^n b_i q_i + \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} q_i q_j, \quad i \neq j \quad (1)$$

$$J^* = \sum_{i=0}^n b_i q_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} q_i^2 + \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} q_i q_j. \quad (2)$$

Построение моделей вида (1) или (2) осуществляется с помощью методов активного планирования экспериментов (после формирования соответствующих матриц наблюдений). Под экспериментом при этом понимается единичный расчет законов изменения во времени режимных показателей пропульсивного комплекса при выполнении соответствующего маневра. Расчеты проводятся с помощью математической модели [2]. Таким образом, аналитические модели – это упрощенная форма обобщения и представления результатов расчетов, выполненных по полной математической модели.

Ниже приведены аналитические зависимости для приближенной оценки нагрузок на силовые элементы гребных электрических установок электроходов при совместном маневрировании рулем и винтами на криволинейной траектории. Расчеты выполнены применительно к ГЭУ с асинхронными частотно-управляемыми ГЭД.

Показатели изменения нагрузок представлены в функции основных обобщенных безразмерных параметров пропульсивных комплексов электроходов: N_X ; C_{M16} ; C_{22} ; C_{65} ; C_{61} ; C_{21} ; $C_{\lambda 21}$; C_{RY} . Значения параметров вычисляются [2] по соотношениям

$$N_X = \frac{L P_{e0}}{(m + \lambda_{11}) v_0^2};$$

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

$$C_{\lambda 21} = \frac{2(\lambda_{22} - \lambda_{11})}{m + \lambda_{11}}; \quad C_{21} = \frac{0,5 C_Y^\beta \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{P_0}; \quad C_{61} = \frac{2m_1 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{P_0};$$

$$C_{RY} = \frac{\mu_K \frac{\rho}{2} v_0^2 S_{\Pi} (1 - \psi)^2}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}; C_{22} = \frac{c_2 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}};$$

$$C_{65} = \frac{2 \left[0,739 + 8,7 \frac{T}{L} \right] C_{m0}^{\omega} \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{P_0},$$

где β_{M0} – абсолютное скольжение ротора ГЭД (индекс “0” здесь и далее относится к базовому режиму работы, соответствующему движению судна с номинальной мощностью двигателей); 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 $\lambda_{11}, \lambda_{22}$ – масса судна и присоединенные массы воды вдоль его продольной и поперечной осей; P_{e0} – полезный суммарный упор гребных винтов; L – длина судна; v_0 – скорость движения судна в установившемся режиме работы при номинальной мощности двигателей; C_Y^{β} – коэффициент позиционной гидродинамической силы, действующей на корпус корпуса; F_D – приведенная площадь погруженной части диаметральной плоскости судна; ρ – удельная плотность воды; S_{Π} – приведенная площадь пера руля; m_1 – коэффициент позиционного момента сопротивления; C_{m0}^{ω} – коэффициент демпфирующего момента сопротивления.

В приведенных ниже аналитических зависимостях безразмерные параметры представлены 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; $\Delta q_i = q_{i \max} - q_{i0} = q_i - q_{i \min}$ – интервал его изменения.

Выполненные расчеты и обработка их результатов дала возможность представить основные показатели изменения нагрузок на элементы ГЭУ полиномами вида (1). В частности, для внешнего относительно центра циркуляции силового контура:

– относительное изменение угловой скорости вращения гребных электродвигателей и гребных винтов

$$\Delta \omega_M = 0,076 - 0,051 N_X - 0,029 C_{M16} - 0,004 C_{61} +$$

$$+ 0,006 C_{\lambda 21} + 0,004 C_{RY} + 0,016 N_X C_{M16}; \quad (3)$$

– относительное изменение мощности первичных двигателей

$$\begin{aligned} \Delta P_D = & 0,227 - 0,129N_X + 0,131C_{M16} - 0,026C_{22} - 0,118N_X C_{M16} - 0,026C_{M16}C_{65} - \\ & - 0,02C_{M16}C_{61} + 0,014C_{21}C_{65} + 0,015C_{21}C_{61} - 0,015C_{21}C_{\lambda 21} + 0,016C_{65}C_{61} - \\ & - 0,014C_{65}C_{\lambda 21} - 0,014C_{61}C_{\lambda 21}; \end{aligned} \quad (4)$$

– относительное изменение тока ГЭД

$$\begin{aligned} \Delta I_M = & 0,205 - 0,138N_X + 0,116C_{M16} - 0,012C_{65} - 0,011C_{61} - 0,013C_{\lambda 21} - \\ & - 0,09N_X C_{M16} - 0,011C_{22}; \end{aligned} \quad (5)$$

– относительное изменение вращающего момента ГЭД

$$\begin{aligned} \Delta M_M = & 0,147 - 0,097N_X + 0,121C_{M16} - 0,01C_{65} - 0,008C_{61} + 0,009C_{\lambda 21} - \\ & - 0,01C_{22} - 0,088N_X C_{M16}. \end{aligned} \quad (6)$$

Результаты расчетов могут быть также представлены в графическом виде. В частности, на рис. 3-5 приведены зависимости $\Delta\omega_M$, ΔP_D , ΔI_M и ΔM_M от значимо влияющих безразмерных параметров.

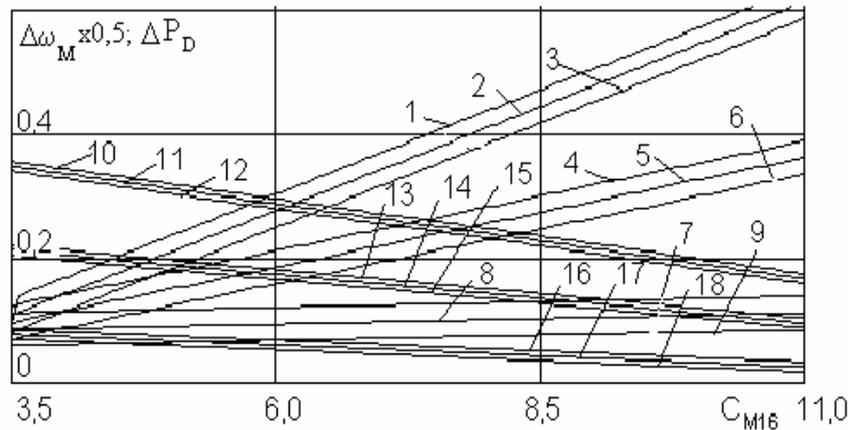


Рис. 3. Зависимости $\Delta\omega_M$ и ΔP_D
от безразмерных параметров комплексов

Зависимости относительного приращения мощности первичных двигателей ΔP_D от параметра C_{M16} , построенные на рис. 3, соответствуют: 1 – $N_X = 0,07$; $C_{22} = 15$; 2 – $N_X = 0,07$; $C_{22} = 30$; 3 – $N_X = 0,07$; $C_{22} = 45$; 4 – $N_X = 0,12$; $C_{22} = 15$; 5 – $N_X = 0,12$; $C_{22} = 30$; 6 – $N_X = 0,12$; $C_{22} = 45$; 7 – $N_X = 0,2$; $C_{22} = 15$; 8 – $N_X = 0,2$; $C_{22} = 30$; 9 – $N_X = 0,2$; $C_{22} = 45$.

Относительное изменение угловой скорости $\Delta\omega_M$ представлено в функции параметра C_{M16} при сочетаниях остальных значимых параметров: 10 – $N_X = 0,07$; $C_{RY} = 1$; 11 – $N_X = 0,07$; $C_{RY} = 1,25$; 12 – $N_X = 0,07$;

$C_{RY} = 1,5$; 13 – $N_X = 0,12$; $C_{RY} = 1$; 14 – $N_X = 0,12$; $C_{RY} = 1,25$; 15 – $N_X = 0,12$; $C_{RY} = 1,5$; 16 – $N_X = 0,2$; $C_{RY} = 1$; 17 – $N_X = 0,2$; $C_{RY} = 1,25$; 18 – $N_X = 0,2$; $C_{RY} = 1,5$.

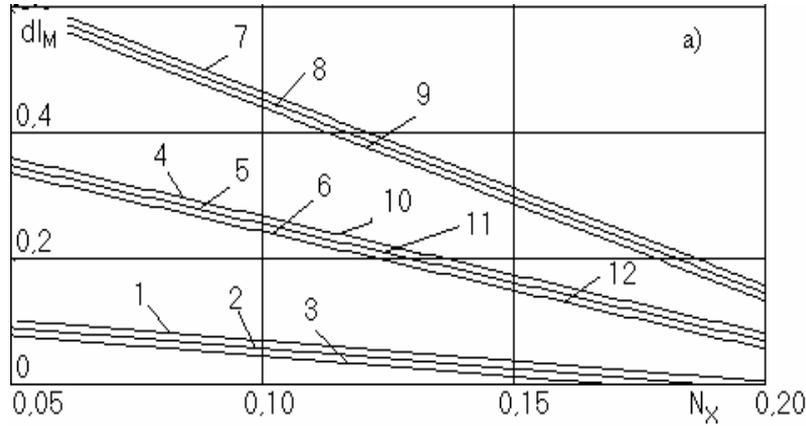


Рис. 4. Зависимость ΔI_M от безразмерных параметров комплексов

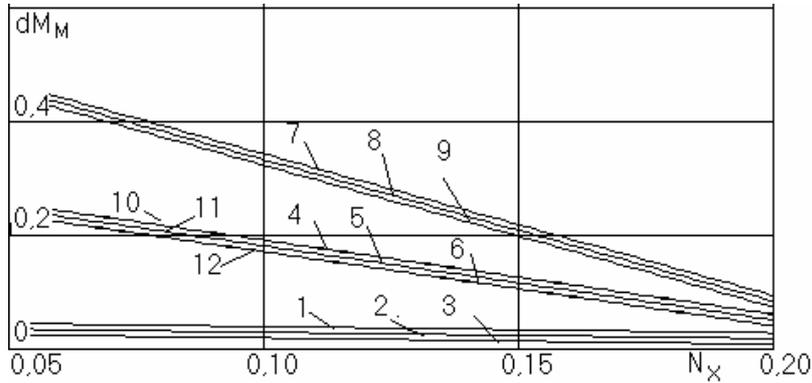


Рис. 5. Зависимость ΔM_M от безразмерных параметров комплексов

Зависимости относительного приращения тока ΔI_M и вращающего момента ΔM_M асинхронного ГЭД от параметра N_X приведены, соответственно, на рис. 4 и рис. 5. Здесь: 1 – $C_{M16} = 4$; $C_{65} = 3,5$; $C_{61} = 2,4$; 2 – $C_{M16} = 4$; $C_{65} = 4$; $C_{61} = 2,4$; 3 – $C_{M16} = 4$; $C_{65} = 4,5$; $C_{61} = 2,4$; 4 – $C_{M16} = 8$; $C_{65} = 3,5$; $C_{61} = 2,4$; 5 – $C_{M16} = 8$; $C_{65} = 4$; $C_{61} = 2,4$; 6 – $C_{M16} = 8$; $C_{65} = 4,5$; $C_{61} = 2,4$; 7 – $C_{M16} = 12$; $C_{65} = 3,5$; $C_{61} = 2,4$; 8 – $C_{M16} = 12$; $C_{65} = 4$; $C_{61} = 2,4$; 9 – $C_{M16} = 12$; $C_{65} = 4,5$; $C_{61} = 2,4$; 10 – $C_{M16} = 8$; $C_{65} = 4$; $C_{61} = 1,9$; 11 – $C_{M16} = 8$; $C_{65} = 4$; $C_{61} = 2,4$; 12 – $C_{M16} = 8$; $C_{65} = 4$; $C_{61} = 2,9$.

Графический вариант представления результатов расчета удобен в пользовании и дает возможность наглядного анализа характера и степени влияния безразмерных параметров комплекса на нагрузки в гребных электрических установках электроходов.

Как было отмечено выше, существенное влияние на нагрузки в силовых элементах ГЭУ оказывает относительная глубина воды $h_T = h/T_c$ (h – глубина воды; T_c – осадка судна). Для приближенного практического расчета режимов работы гребных электрических установок на мелководье достаточно принимать во внимание изменение коэффициентов взаимодействия движителей с корпусом судна, сопротивления воды и присоединенных к корпусу масс воды. Применительно к разработанной [2] модели это можно осуществить:

1. Введением поправочных коэффициентов $\chi_{\psi h}$ и χ_{th} , учитывающих влияние мелководья на коэффициенты попутного потока и засасывания гидродинамической характеристики движителей

$$\chi_{\psi h} = \frac{1 - \psi_h}{1 - \psi_\infty}; \quad \chi_{th} = \frac{1 - t_h}{1 - t_\infty},$$

где ψ_h , и ψ_∞ – коэффициенты попутного потока на мелководье и на глубокой воде;

t_h , и t_∞ – коэффициенты засасывания при тех же условиях.

2. Уточнением силы сопротивления воды движению судна. Применительно к используемой модели это целесообразно сделать по методу П.А. Апухтина, позволяющему рассчитывать потерю скорости хода судна при движении на мелководье.

3. Пересчетом коэффициентов гидродинамических сил и моментов C_Y^α , C_2 , C_m^α , C_m^ω (в общепринятых обозначения) на соответствующую глубину с помощью графиков, приведенных в работе [4].

4. Соответствующей корректировкой величин присоединенных к судну масс воды λ_{11} , λ_{22} , λ_{66} , что может быть выполнено по методике, предложенной в работе [4].

Для количественной оценки степени влияния глубины воды на нагрузки элементов ГЭУ были проведены серии численных экспериментов. В ходе их рассчитывались относительные приращения режимных показателей

$$\Delta P_D^0 = \frac{\Delta P_D}{P_{D \text{ нач.}}}; \quad \Delta M_D^0 = \frac{\Delta M_D}{M_{D \text{ нач.}}}; \quad \Delta M_M^0 = \frac{\Delta M_M}{M_{M \text{ нач.}}}; \quad \Delta \omega_M^0 = \frac{\Delta \omega_M}{\omega_{M \text{ нач.}}}$$

(индекс "нач." означает начальное – на момент выхода судна на циркуляцию – значение соответствующего режимного показателя).

Рассчитывались также и максимальные значения P_{Dm} , M_{Dm} , M_{Mm} этих показателей.

Рассматривались двухвинтовые (см. рис.1) электроходы (индекс "1" относится к внешнему, индекс "2" – к внутреннему, относительно центра циркуляции, силовым контурам). Было учтено, что значимое влияние на рассматриваемые показатели качества оказывают обобщенные безразмерные параметры N_X , C_{M16} и C_{22} .

После обработки результатов численных экспериментов получены аналитические зависимости для оценки в первом приближении изменения нагрузок на силовые элементы ГЭУ при маневрировании на воде различной глубине:

$$\Delta P_{D1}^0 = 0,094 - 0,069N_X + 0,059C_{M16} - 0,030h_T - 0,050N_X C_{M16} + 0,016N_X h_T - 0,012C_{M16} C_{22} + 0,010C_{M16} h_T; \quad (7)$$

$$\Delta P_{D2}^0 = 0,090 - 0,073N_X + 0,055C_{M16} - 0,031h_T - 0,053N_X C_{M16} + 0,015N_X h_T - 0,014C_{M16} C_{22} + 0,008C_{M16} h_T; \quad (8)$$

$$P_{Dm} = 0,694 - 0,102N_X + 0,141C_{M16} - 0,031h_T - 0,057N_X C_{M16} + 0,05N_X h_T + 0,046C_{M16} h_T; \quad (9)$$

$$\Delta M_{D1} = 0,085 - 0,068N_X + 0,036C_{M16} + 0,005C_{22} - 0,022h_T - 0,024N_X C_{M16} + 0,014N_X h_T + 0,009C_{M16} h_T; \quad (10)$$

$$\Delta M_{D2} = 0,084 - 0,074N_X + 0,035C_{M16} + 0,009C_{22} - 0,025h_T - 0,029N_X C_{M16} - 0,005N_X C_{22} + 0,016N_X h_T + 0,005C_{M16} C_{22} + 0,011C_{16} h_T - 0,011C_{22} h_T; \quad (11)$$

$$M_{Dm} = 0,882 - 0,14N_X + 0,198C_{M16} - 0,048h_T - 0,073N_X C_{M16} + 0,08N_X h_T + 0,057C_{M16} h_T; \quad (12)$$

$$\Delta M_{M1} = 0,064 - 0,046N_X + 0,041C_{M16} + 0,005C_{22} - 0,018h_T - 0,033N_X C_{M16} - 0,007N_X C_{22} + 0,007N_X h_T + 0,005C_{M16} C_{22} + 0,008C_{M16} h_T - 0,006C_{22} h_T; \quad (13)$$

$$\Delta M_{M2} = 0,064 - 0,048N_X + 0,040C_{M16} + 0,007C_{22} - 0,019h_T - 0,035N_X C_{M16} - 0,009N_X C_{22} + 0,008N_X h_T + 0,008C_{M16} C_{22} + 0,01C_{M16} h_T - 0,009C_{22} h_T; \quad (14)$$

$$M_{Mm} = 0,934 - 0,105N_X + 0,293C_{M16} - 0,087N_X C_{M16} + 0,052N_X h_T + 0,042C_{M16} h_T; \quad (15)$$

$$\Delta \omega_{M1} = 0,040 - 0,033N_X - 0,008C_{M16} - 0,002C_{22} - 0,014h_T + 0,005N_X C_{M16} + 0,01N_X h_T + 0,003C_{M16} h_T; \quad (16)$$

$$\Delta \omega_{M2} = 0,041 - 0,032N_X - 0,007C_{M16} - 0,003C_{22} - 0,014h_T + 0,006N_X C_{M16} + 0,01N_X h_T + 0,003C_{M16} h_T. \quad (17)$$

Графические зависимости относительных приращений режимных показателей от параметра $1/h_T$ для внешнего (как более нагруженного) силового контура показаны на рис. 6 а (ΔP_D^0 – кривые 1-9 и P_{Dm} – кривые 10-18), на рис. 6 б (ΔM_M^0 – кривые 1-9 и M_{Mm} – кривые 10-18) и на рис. 6 в ($\Delta \omega_{M1}$ – кривые 1-9 и $\Delta \omega_{M2}$ – кривые 10-18).

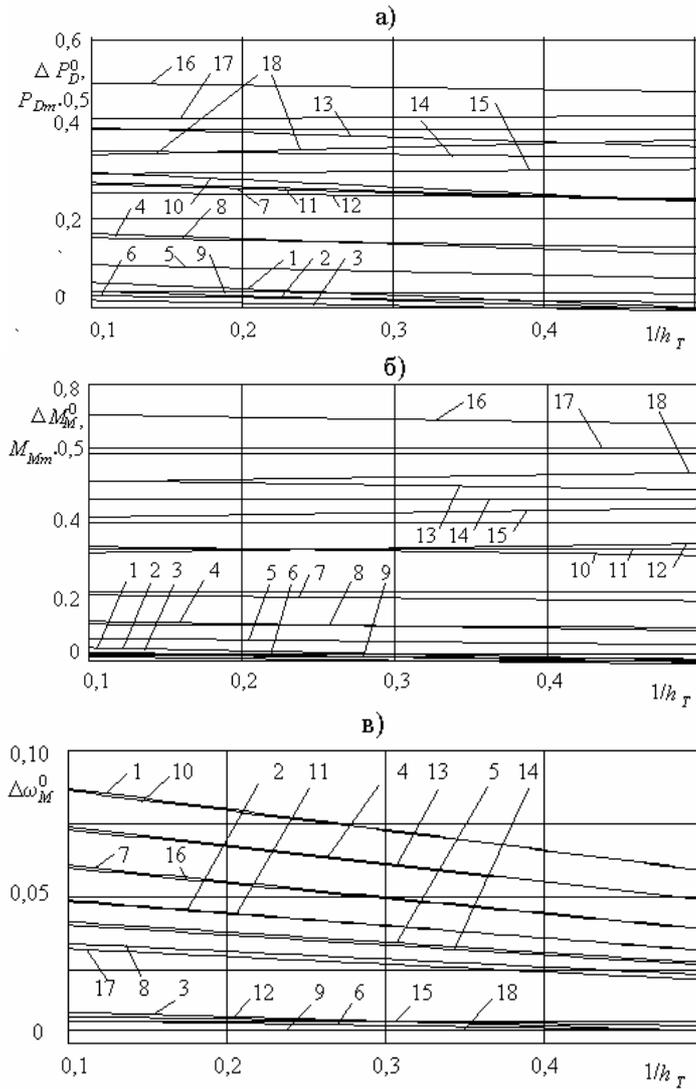


Рис. 6. Зависимости ΔP_D^0 и P_{Dm}^0 (рис. 6 а), ΔM_M^0 и M_{Mm} (рис. 6 б), $\Delta \omega_{M1}$ и $\Delta \omega_{M2}$ (рис. 6 в) от безразмерных параметров комплекса

Зависимости, построенные на рис. 6, соответствуют: 1 – $N_X = 0,07$; $C_{M16} = 4,5$; $C_{22} = 30$; 2 – $N_X = 0,11$; $C_{M16} = 4,5$; $C_{22} = 30$; 3 – $N_X = 0,20$; $C_{M16} = 4,5$; $C_{22} = 30$; 4 – $N_X = 0,07$; $C_{M16} = 7,5$; $C_{22} = 30$; 5 – $N_X = 0,11$; $C_{M16} = 7,5$; $C_{22} = 30$; 6 – $N_X = 0,20$; $C_{M16} = 7,5$; $C_{22} = 30$; 7 – $N_X = 0,07$; $C_{M16} = 12$; $C_{22} = 30$; 8 – $N_X = 0,11$; $C_{M16} = 12$; $C_{22} = 30$; 9 – $N_X = 0,2$; $C_{M16} = 12$; $C_{22} = 30$; 10 – $N_X = 0,07$; $C_{M16} = 4,5$; $C_{22} = 30$; 11 – $N_X = 0,11$; $C_{M16} = 4,5$; $C_{22} = 30$; 12 – $N_X = 0,20$; $C_{M16} = 4,5$; $C_{22} = 30$; 13 – $N_X = 0,07$; $C_{M16} = 7,5$; $C_{22} = 30$; 14 – $N_X = 0,11$; $C_{M16} = 7,5$; $C_{22} = 30$; 15 – $N_X = 0,20$; $C_{M16} = 7,5$; $C_{22} = 30$.

$C_{22} = 30; 16 - N_X = 0,07; C_{M16} = 12; C_{22} = 30; 17 - N_X = 0,11; C_{M16} = 12;$
 $C_{22} = 30; 18 - N_X = 0,20; C_{M16} = 12; C_{22} = 30.$

Из полученных аналитических зависимостей и рис.6 видно, что с выходом на циркуляцию внутренние силовые контуры нагружаются в меньшей степени, чем внешние. Относительно небольшое отличие режимов их работы обусловлено тем, что в ходе численных экспериментов учитывалось только неравенство углов скоса потока и относительной скорости подтекания воды к винтам. С уменьшением глубины воды значения показателей ΔP_D^0 , ΔM_D^0 и ΔM_M^0 снижаются, что обусловлено уменьшением скорости Δv^0 . То же самое наблюдается и у гребных винтов – $\Delta \Omega_M$ уменьшается. Сложнее обстоит дело с максимальными значениями соответствующих режимных показателей. Влияние на них глубины воды зависит от "энерговооруженности" электроходов – N_X . У судов с малыми значениями N_X мелководье снижает, а у электроходов с большими N_X – наоборот повышает максимальные значения P_{Dm} , M_{Mm} , M_{Mm} . Причем, влияние самого параметра h_T на рассматриваемые показатели качества невелико (например, для показателя M_{Mm} оно вообще менее 5 %), однако, весьма сильны эффекты взаимодействий h_T с значимыми параметрами N_X и C_{M16} .

Для повышения маневренных качеств двухвинтовых электроходов с выходом их на циркуляцию один из ГЭД (внутренний, относительно центра циркуляции) переводится в режим "подтормаживания". При анализе таких режимов целесообразно, помимо отмеченных выше значимо влияющих параметров комплексов, учесть также: безразмерный параметр – C_{RY} , угол отклонения пера руля – β_R и степень подтормаживания внутреннего гребного электродвигателя $\alpha_{ПТ} = \alpha_H - \alpha_{Ц}$ (Здесь α_H – относительная частота питающего ГЭД напряжения перед выходом на циркуляцию; $\alpha_{Ц}$ – относительная частота на циркуляции).

При таком маневрировании происходит еще большее изменение нагрузок на гребные электродвигатели, генераторы электрического тока и, соответственно, на тепловые двигатели ГЭУ. Как показали исследования, в этих случаях аналитические модели первого порядка оказываются неадекватными при оценке нагрузок на ГЭУ. Поэтому необходимо воспользоваться полиномами 2-го порядка вида (2). Для построения таких моделей удобными пользоваться методами центрального композиционного планирования (ЦКП).

Расчеты показателей качества и построение их аналитических моделей вида (2) дали следующие результаты (индекс "1" относится к внешнему, а индекс "2" – к внутреннему, относительно центра циркуляции, силовым контурам):

– относительное приращение мощности первичных двигателей

$$\Delta P_{D1} = 0,29 - 0,08N_X + 0,07C_{M16} + 0,01C_{RY} + 0,03\beta_R + 0,01\alpha_{ПТ} - 0,01N_X^2 - 0,01C_{M6}^2 + 0,01C_{RY}^2 + 0,01\alpha_{ПТ}^2 - 0,03N_X C_{M16} + 0,01N_X \beta_R; \quad (18)$$

$$\Delta P_{D2} = -0,19 - 0,12N_X - 0,37C_{M16} + 0,09C_{RY} + 0,09\beta_R - 0,147\alpha_{\text{ПТ}} - 0,07C_{M16}^2 + 0,06C_{RY}^2 + 0,05\beta_R^2 + 0,11\alpha_{\text{ПТ}}^2 + 0,03N_X C_{M16} - 0,12N_X \alpha_{\text{ПТ}} - 0,33C_{M16} \alpha_{\text{ПТ}} + 0,02C_R \beta_R + 0,02\beta_R \alpha_{\text{ПТ}}; \quad (19)$$

– относительное приращение тока ГЭД

$$\Delta I_{M1} = 0,28 - 0,08N_X + 0,05C_{M16} + 0,01C_{RY} + 0,03\beta_R + 0,01\alpha_{\text{ПТ}} - 0,01N_X^2 - 0,01C_{M16}^2 + 0,01C_{RY}^2 + 0,02\alpha_{\text{ПТ}}^2 - 0,02N_X C_{M16} + 0,01N_X \beta_R; \quad (20)$$

$$\Delta I_{M2} = -0,13 - 0,09N_X - 0,27C_{M16} + 0,08C_{RY} + 0,09\beta_R - 0,06\alpha_{\text{ПТ}} - 0,01C_{M16}^2 + 0,06C_{RY}^2 + 0,05\beta_R^2 + 0,11\alpha_{\text{ПТ}}^2 + 0,04N_X C_M - 0,01N_X C_{RY} - 0,01N_X \beta_R - 0,08N_X \alpha_{\text{ПТ}} + 0,01C_{M16} C_{RY} - 0,01C_M \beta_R - 0,24C_{M16} \alpha_{\text{ПТ}} + 0,03C_{RY} \beta_R + 0,01\beta_R \alpha_{\text{ПТ}}; \quad (21)$$

– относительное изменение вращающего момента ГЭД

$$\Delta M_{M1} = 0,21 - 0,06N_X + 0,07C_{M16} + 0,01C_{RY} + 0,02\beta_R + 0,01\alpha_{\text{ПТ}} - 0,01N_X^2 - 0,02C_{M16}^2 + 0,01C_{RY}^2 + 0,02\alpha_{\text{ПТ}}^2 - 0,03N_X C_{M16} + 0,01N_X \beta_R; \quad (22)$$

$$\Delta M_{M2} = 0,01 - 0,02N_X - 0,02C_{M16} + 0,06C_{RY} + 0,05\beta_R + 0,13\alpha_{\text{ПТ}} + 0,04N_X^2 + 0,03C_{M16}^2 + 0,06\beta_R^2 + 0,10\alpha_{\text{ПТ}}^2 + 0,04N_X C_{M16} - 0,01N_X C_{RY} - 0,01N_X \beta_R - 0,03N_X \alpha_{\text{ПТ}} - 0,01C_{M16} \beta_R - 0,07C_{M16} \alpha_{\text{ПТ}} + 0,02C_{RY} \beta_R - 0,01C_{RY} \alpha_{\text{ПТ}} + 0,01\beta_R \alpha_{\text{ПТ}}; \quad (23)$$

– относительное снижение угловой скорости вращения внешнего ГЭД

$$\Delta \omega_{M1} = 0,073 - 0,028N_X - 0,026C_{M16} + 0,004C_{RY} + 0,004\alpha_{\text{ПТ}} + 0,008C_{M16}^2 + 0,003\alpha_{\text{ПТ}}^2 + 0,005N_X C_{M16} + 0,003N_X \beta_R - 0,003C_{M16} \alpha_{\text{ПТ}}; \quad (24)$$

$$\Delta \omega_{M2} = 0,147 - 0,071N_X - 0,048C_{M16} + 0,030C_{RY} + 0,039\beta_R + 0,062\alpha_{\text{ПТ}} + 0,015N_X^2 + 0,009C_{M16}^2 + 0,027C_{RY}^2 + 0,0227\beta_R^2 + 0,050\alpha_{\text{ПТ}}^2 + 0,012N_X C_{M16} + 0,004N_X \beta_R - 0,019N_X \alpha_{\text{ПТ}} - 0,038C_{M16} \alpha_{\text{ПТ}} + 0,007C_{RY} \beta_R. \quad (25)$$

В качестве примера, на рис. 7 приведены зависимости ΔM_{M1} и $\Delta \omega_{M1}$ от наиболее значимых параметров комплексов.

Приращение вращающего момента ΔM_{M1} и угловой скорости вращения $\Delta \omega_{M1}$ ГЭД здесь изображены в функции коэффициента вращающего момента C_{M16} . Показатель ΔM_{M1} описывается кривыми 10-18, а показатель $\Delta \omega_{M1}$ – кривыми 1-9.

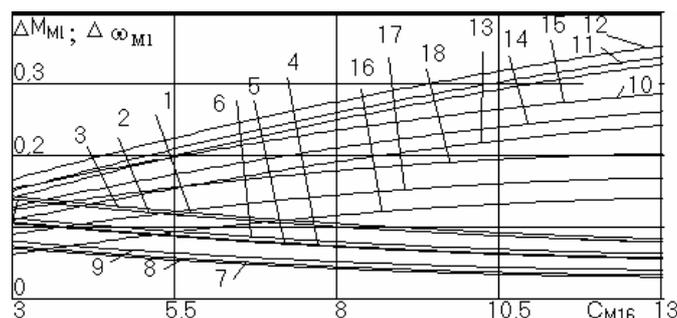


Рис. 7. Залежність ΔM_{M1} і $\Delta \omega_{M1}$ від параметрів комплексів

Криві відповідають: 1 і 10 – $N_X = 0,06$; $\beta_R = 0,157$; 2 і 11 – $N_X = 0,06$; $\beta_R = 0,425$; 3 і 12 – $N_X = 0,06$; $\beta_R = 0,715$; 4 і 13 – $N_X = 0,12$; $\beta_R = 0,157$; 5 і 14 – $N_X = 0,12$; $\beta_R = 0,436$; 6 і 15 – $N_X = 0,12$; $\beta_R = 0,715$; 7 і 16 – $N_X = 0,20$; $\beta_R = 0,157$; 8 і 17 – $N_X = 0,20$; $\beta_R = 0,436$; 9 і 18 – $N_X = 0,20$; $\beta_R = 0,715$.

Таким образом, полученные результаты позволяют рассчитать в первом приближении основные показатели качества маневрирования. Их анализ показывает, что степень подтормаживания α_t существенно влияет на нагрузку гребных и первичных двигателей энергетической установки. Причем, это влияние неоднозначно. При выходе на циркуляцию нагрузки на внешний силовой контур возрастают, а на внутренний – падают. Подтормаживание гребным винтом способствует росту этого эффекта. Нагрузки на внешний силовой контур увеличиваются до 8 %, а на внутренний контур снижаются до 70 %.

Возможности разработанного метода (с оценкой получаемых при этом погрешностей) проиллюстрированы на примере конкретного электрохода с заменой его гребной электрической установки более перспективный вариант – ГЭУ с частотно-управляемыми гребными электродвигателями.

Основные технические характеристики пропульсивного комплекса электрохода.

Судно: длина 51,7 м; ширина 15,01 м; осадка 4,2 м; водоизмещение 1763 т; мощность главных двигателей 2200 кВт; скорость движения 7 м/с.

В состав судовой энергетической установки входят:

- два дизель-генераторных агрегата, каждый из которых содержит дизель с эффективной мощностью 1100 кВт при 750 об./мин. и синхронный генератор мощностью 1000 кВт при 750 об./мин.;
- преобразователи частоты;

– два асинхронных гребных электродвигателя, имеющих основные расчетные параметры: мощность 1000 кВт; вращающий момент 10670 Нм; угловая скорость вращения $93,67 \text{ с}^{-1}$.

Отдельные результаты расчетов основных показателей, выполненные для этого судна с помощью ЭВМ по полной математической модели, представлены в графе "Точный расчет" табл. 3. Здесь же приведены значения соответствующих показателей, полученные по полученным выше аналитическим моделям – графа "Приближенный расчет". Погрешности аналитического метода даны в соответствующей графе табл. 3.

Таблица 3

Оценка погрешности аналитического метода расчета

Показатели качества	Точный расчет	Приближенный расчет	Погрешность, %
1. Изменения скорости ГЭД и гребных винтов – $\Delta\omega_M$	0,0484	0,05	3,2
2. Изменение мощности первичных двигателей – ΔP_D	0,3871	0,345	12,1
3. Изменение тока ГЭД – ΔI_M	0,349	0,375	6,9
4. Изменение вращающего момента ГЭД – ΔM_M	0,278	0,333	16,5
5. Продолжительность маневра – $T_{\text{ман}}$	22,521	20,5	9,8
6. Затраты топлива на выполнение маневра – $G_{\text{ман}}$	31	30,5	1,5

Сравнение результатов показывает, что погрешности в определении показателей качества работы гребных электрических установок на маневрах с помощью аналитических моделей находятся в допустимых для решения динамических задач границах (2-17 %). Это подтверждает приемлемость разработанного приближенного аналитического метода для оценки нагрузок на ГЭУ при циркуляционном движении электроходов.

Выводы

1. С выходом электроходов на криволинейную траекторию существенно изменяются нагрузки на все составные части их гребных электрических установок. Степень изменения нагрузки зависит от того, является ли контур внутренним или внешним относительно центра циркуляции. Значимое влияние на это оказывают и условия, и характер выполнения маневра.

2. На начальных этапах проектирования для оценки нагрузок на элементы ГЭУ нужны упрощенные методы расчета, не требующие сложных и зачастую нереализуемых (по причине отсутствия необходимой информации) вычислительных процедур.

3. Для решения таких задач предложен способ оценки нагрузок на гребные электрические установки электроходов при совместном маневрировании рулем и винтами на криволинейной траектории движения судна. Разработаны полиномиальные модели для расчета основных показателей качества работы всех составных частей ГЭУ. Погрешности, возникающие при использовании моделей, находятся в допустимых для рассматриваемого класса задач пределах.

4. В сочетании с другими критериями оценки качества проектирования гребных электрических установок это способствует созданию высокоманевренных, экономичных и надежных судов с электродвижением.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Зубарев Ю.А. Расчет судовых автоматизированных систем методом активного планирования эксперимента / Ю.А. Зубарев, А.Д. Собашиников, В.А. Юхнович. – Л.: Судостроение, 1976. – 96 с.*
2. *Яровенко В.А. Расчет и оптимизация переходных режимов пропульсивных комплексов электроходов / В.А. Яровенко. – Одесса: Маяк, 1999. – 188 с.*
3. *Яровенко В.А. Совместное управление гребной энергетической установкой и рулем на маневрах // Судовые энергетические установки: Научн.-техн. сб. – 2001. – № 6. – Одесса: ОГМА. – С. 109-114.*
4. *Басин А.М. Гидродинамика судна на мелководье / А.М. Басин, И.О. Веледницкий, А.Г. Ляховецкий. – Л.: Судостроение, 1976. – 320 с.*

Стаття надійшла до редакції 19.02.2014

Рецензент –