

УДК 629.12-8:629.12.037

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

**ОЦЕНКА МАНЕВРЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОХОДОВ
НА НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЯХ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Надійність і безпека маневрених операцій залежить від сумісної роботи електроенергетичної установки, гвинтів й корпусу електрохода. Запропоновано спосіб оцінки маневрених характеристик електроходів на початковому етапі проектування. Виявлено параметри пропульсивних комплексів, які найбільш значимо впливають на ці показники. Розроблено прості математичні моделі – аналітичні залежності показників від параметрів комплексів. Моделі дозволяють вже на початкових стадіях проектування, в умовах обмеженої інформації прогнозувати маневрені властивості суден та знаходити шляхи їх поліпшення.

Ключові слова: показники якості маневрування електроходів, метод оцінки, аналітичні залежності показників від параметрів комплексів.

Надежность и безопасность маневренных операций определяется совместной работой электроэнергетических установок, двигателей и корпуса электроходов. Предложен способ оценки маневренных характеристик электроходов на начальных этапах проектирования. Выявлены параметры пропульсивных комплексов, наиболее значимо влияющие на эти показатели. Разработаны простые математические модели – аналитические зависимости показателей от параметров комплексов. Модели позволяют на начальных стадиях проектирования в условиях ограниченной информации прогнозировать маневренные свойства судов и находить пути их улучшения.

Ключевые слова: показатели качества маневрирования электроходов, метод оценки, аналитические зависимости показателей от параметров комплексов.

Interest in the use of electric motion in the shipbuilding industry is growing. The main advantages of electric ships are: reliability; economy when operating at reduced speeds; high maneuverability. The reliability and safety of maneuvering operations is determined by the joint operation of the power plant, propulsors and electric ship's hull. Therefore, the ability to assess the maneuverability characteristics of all components of electric ships' propulsion complexes at the initial stages of their design is **urgent**. The search for methods of such an assessment is **the goal of this paper**. The peculiarity of electric ships' operation on maneuvers is that the duration of transient processes in the power plant are commensurable with the duration of the transient processes in ship's movement. Therefore, the analysis of the operating conditions of the electrical propulsion plant should be carried out in unity with all the components of the propulsion complex. **The state of the question.** A mathematical model of transient regimes for the analysis of maneuvering operation modes has been developed. It describes the transient regimes of all the components of the complex. The criteria of dynamic similarity – the dimensionless parameters of the system "electrical propulsion plant – propellers – ship's hull" are revealed. It is these parameters that determine the quality of maneuvering. **The result of the study.** Simple calculation methods in estimating and predicting electric ships' maneuverability characteristics at the early stages of designing are necessary. For this purpose, significantly influencing parameters for each quality index were revealed. And then using the methods of active experiment planning, analytical models – the dependencies of the indicators on the parameters of the complex and the significant interaction effects of the parameters – were constructed. The possibilities of using the developed analytical models for estimating the main maneuvering indices are illustrated. At the same time, the error in the calculation method is also estimated. As the object of comparison, the design of the vessel with frequency-controlled propulsion motors was chosen. Calculation results of the quality indicators of maneuvering by approximate and exact methods are compared to evaluate the error in analytical models. The errors are in the range 3,8 – 11,7%. They are acceptable for dynamic calculations. The application of the proposed models to find ways of improving maneuverability is illustrated. **Conclusions.** Convenient methods of evaluation are necessary for an approximate assessment of the basic performance indicators at the initial stages of designing electromechanical systems. Simple analytical models are proposed to assess the maneuvering regimes. Errors in the calculation method are within acceptable limits.

Key words: quality indicators of electric ships' maneuverability, estimation method, analytical dependencies of indicators on complexes' parameters.

Актуальность задачи. В последние десятилетия во всем мире резко возрос интерес к использованию электродвижения в судостроении. В первую очередь это обусловлено теми неоспоримыми преимуществами, которыми обладают электроходы по сравнению с судами с непосредственной передачей вращающего момента первичных двигателей на гребные винты. К этим достоинствам относятся возможности: применения быстроходных неререверсивных первичных двигателей; свободной компоновки оборудования на судне и высвобождения дополнительных площадей; эффективного использования машинного отделения; дробления полной мощности на несколько частей и работы каждого первичного двигателя на несколько винтов, что повышает живучесть и гибкость энергетической установки [1].

К достоинствам эксплуатационного характера относятся: повышенная надежность; простота и широкие возможности дистанционного управления; относительная экономичность при работе на "промежуточных ходах" (что в настоящее время все чаще используется), повышенные маневренные качества [2, 3]. А ведь именно за счет высоких

маневренных свойств в первую очередь обеспечивается безопасность выполнения маневренных операций. С этой точки зрения, именно суда с электродвижением обладают неоспоримыми преимуществами перед традиционным типом привода судовых двигателей. Высокая маневренность судов, оборудованных гребными электрическими установками, одна из основных причин, обусловивших причину столь высокого интереса к современным системам электродвижения [4].

В связи с этим, весьма актуальной является необходимость в оценке маневренных характеристик электроходов уже на самых начальных стадиях их проектирования. Поиск способов оценки основных показателей качества маневрирования и является **целью настоящей работы.**

Состояние рассматриваемого вопроса.

Отличительной особенностью работы электроходов на маневрах является то, что продолжительности переходных процессов в судовой электроэнергетической установке (СЭУ) оказываются соизмеримыми с продолжительностями переходных процессов движения самого судна. Поэтому, традиционные допущения о постоянстве частоты

вращения гребных винтов при движении судна на маневрах (равно как и наоборот) не приемлемы. Анализ режимов работы судна следует проводить в единстве со всеми составными частями судового пропульсивного комплекса, который включает в себя электроэнергетическую установку, гребные винты и корпус судна. Только так (рассматривая весь пропульсивный комплекс в целом) можно оценить маневренные свойства электрохода.

Метод решения задачи

Для анализа маневренных режимов в [5] предложена математическая модель. Она описывает переходные режимы работы всех составных частей единого судового пропульсивного комплекса. Модель универсальна, охватывает подавляющее большинство современных и перспективных электроходов с традиционным типом движителей.

Для придания общности результатам анализа математическая модель приведена к относительным единицам. В результате этого выявлены критерии динамического подобия пропульсивных комплексов. Это – безразмерные параметры системы "тепловые двигатели – гребная электрическая установка – движители – корпус судна". Именно эти параметры и определяют законы изменения во времени относительных режимных показателей всех составных частей комплекса и определяют численные значения показателей качества маневрирования. Такой подход позволяет придать общность получаемым результатам – электроходы с равными значениями безразмерных параметров будут иметь соответственно одинаковые значения (в относительных единицах) показателей качества маневрирования.

Математическая модель и разработанный на ее основе метод расчета текущих значений режимных показателей электроэнергетической установки позволяет решать задачи оптимального проектирования [6, 7] и оптимального управления [8] гребными электродвигателями (ГЭД) электроходов на маневрах.

Однако, на ранних стадиях проектных разработок при оценке маневренных характеристик электроходов, для прогнозирования маневренных свойств электроходов нужны простые методы расчета. При их построении необходимо в первую очередь исходить из условия ограниченного объема технической информации о проектируемом объекте. В качестве таких методов широко используются аналитические методы, основанные на представлении показателей качества их аналитическими моделями.

В работе [9] предложено рассчитывать показатели качества с помощью полиномиальных моделей. Эти модели представляют собой приближенные аналитические зависимости показателей качества маневрирования от параметров пропульсивного комплекса электрохода. При установлении связей показателей качества J с параметрами пропульсивного комплекса q_i используется прием адекватного представления показателя $J = J(q_1, q_2, \dots, q_n)$ некоторой приближенной аналитической моделью $J^* = J^*(q_1, q_2, \dots, q_n)$. При построении таких аналитических моделей наибольшее применение получило многочленное приближение

$J^*(\mathbf{B}, \mathbf{q})$, где \mathbf{B} – вектор коэффициентов приближенного полинома. Для анализа судовых электромеханических систем чаще всего достаточно ограничиться представлением показателей J^* полиномами первого (1) или второго (2) порядков

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

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

Численные значения этих показателей определяются решением системы уравнений, описывающих переходные режимы работы комплекса. Однако, в начальной стадии проектирования при большом числе параметров комплекса (их более 50) и ограниченном, как было отмечено, объеме информации об объекте, решение задачи оказывается нереальным. Известно, что значимое влияние на показатели качества подобных сложных электромеханических систем оказывают лишь небольшое (до 8–10) число параметров. В таких случаях на первом этапе расчетов необходимо провести отсеивающие эксперименты и выявить [3] по каждому показателю качества значимые параметры и значимые эффекты взаимодействий параметров, отнеся (обоснованно) остальные к шумовому полю.

Достижение поставленной в работе цели осуществлялось в два этапа.

Первый – выявление по каждому показателю качества значимо влияющих параметров. Для этого использовался метод случайного баланса. Отсеивающие эксперименты, выполненные [10] по полной математической модели [5] методом случайного баланса, позволили выявить по каждому показателю качества значимые параметры. Результаты, в виде вкладов факторов и эффектов взаимодействий факторов в соответствующий показатель качества, могут быть представлены в виде уравнений регрессии или в графическом виде (гистограммами). Здесь полученные результаты показаны по второму варианту представления. На гистограммах по оси абсцисс проставлены (в порядке убывания вкладов) значимые параметры и значимые эффекты взаимодействия параметров, а по оси ординат – их вклады в соответствующий показатель качества в процентах. (Соотношения для расчета численных значений параметров приведены ниже). Влияния изменений значений остальных параметров пропульсивных комплексов и эффектов взаимодействий, как показала статистическая обработка результатов расчетов, несущественно и в дальнейших расчетах эти параметры можно принимать неварьируемыми.

Второй – построение аналитических моделей показателей качества маневрирования – зависимостей показателей качества от значимых параметров пропульсивного комплекса и значимых эффектов взаимодействия параметров. Построение моделей вида (1) и (2) осуществлялось (после формирования соответствующих матриц "наблюдений") с помощью одного из методов активного планирования эксперимента. Под экспериментом при этом понимался единичный расчет законов изменения во времени режимных показателей пропульсивного

комплекса электрохода при выполнении соответствующего маневра. Расчеты проводились на базе математической модели [5], описывающей переходные режимы судовых энергетических установок в составе пропульсивных комплексов электроходов на маневрах.

Результаты исследований.

К важнейшим показателям качества маневрирования гребной электроэнергетической установки в составе пропульсивного комплекса электроходов следует отнести:

- продолжительность разгона – $T_{\text{разг.}}$;
- выбег электрохода при разгоне – $X1_{\text{разг.}}$;
- затраты энергии на разгон судна – $W_{\text{разг.}}$;
- скорость электрохода к концу разгона – $v_{\text{разг.}}$;
- продолжительность торможения гребных электродвигателей (ГЭД) – $T_{\text{торм.ГЭД}}$;
- продолжительность торможения СЭУ – $T_{\text{торм.СЭУ}}$;

- затраты энергии на торможение – $W_{\text{торм.}}$;
- выбег судна при торможении – $X1_{\text{торм.}}$;
- максимальная мощность ГЭД – $P_{\text{ГЭД max}}$;
- продолжительность реверса электрохода – $T_{\text{рев.}}$.

Для всех показателей проведены исследования и найдены аналитические зависимости для количественной оценки показателей качества маневрирования от безразмерных параметров комплексов. Некоторые результаты приведены, в качестве примера, ниже.

Продолжительность разгона – $T_{\text{разг.}}$

Гистограмма с вкладами значимых параметров и значимых эффектов взаимодействий параметров в продолжительность разгона – $T_{\text{разг.}}$ приведена на рис. 1.

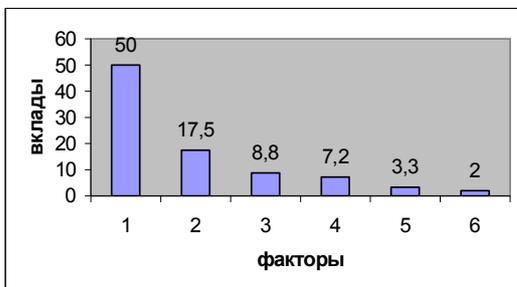


Рис. 1 – Вклады параметров и эффектов взаимодействий в показатель $T_{\text{разг.}}$

Факторам на рис. 1 соответствуют безразмерные параметры комплекса: 1 – N_X ; 2 – C_{M16} ; 3 – N_M ; 4 – $C_{M23}N_X$; 5 – C_{M23} ; 6 – N_MN_X . (Соотношения для их расчета и способ нормирования, как было отмечено, будут приведены ниже).

Аналитическая зависимость для оценки продолжительности разгона для комбинированного маневра "разгон – торможение – реверс":

$$T_{\text{разг.}} = 27,2 - 4,68N_X + 1,97C_{M23} + 1,72C_{M23}C_{M24} - 1,69C_{M20} - 1,59C_{M24} - 1,06C_{M24}C_{M20} - 0,94C_{M20}C_{M23} - 0,88N_XC_{M23} + 0,84N_XC_{M20} - 0,69C_{M24}C_{M17}. \quad (3)$$

Выбег электрохода к концу разгона – $X1_{\text{разг.}}$

Вклады значимых параметров и эффектов взаимодействий в величину выбега электрохода ($X1_{\text{разг.}}$) приведены на рис. 2.

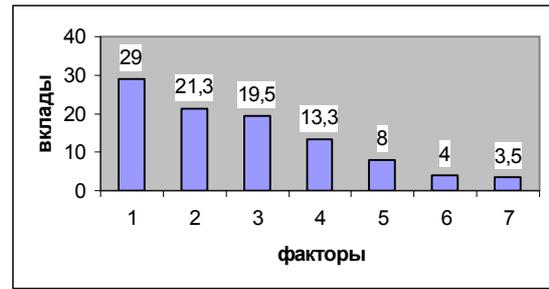


Рис. 2 – Вклады параметров и эффектов взаимодействий в показатель $X1_{\text{разг.}}$

Обозначения на рис. 2 соответствуют: 1 – N_X ; 2 – C_{M16} ; 3 – C_{M20} ; 4 – C_{M23} ; 5 – $C_{M16}C_{M23}$; 6 – $C_{M20}C_{M23}$; 7 – N_M .

Аналитическая зависимость для оценки выбега электрохода $X1_{\text{разг.}}$:

$$X1_{\text{разг.}} = 11,67 - 6,21N_X - 1,39C_{M20} + 0,56N_XC_{M20} + 0,55C_{M17} + 0,54N_XC_{M23} + 0,49C_{M24}C_{M17} + 0,47C_{M23}C_{M17} - 0,43C_{M24}C_{M20} - 0,4C_{M23} + 0,31C_{M24}C_{M23}. \quad (4)$$

Затраты энергии на разгон электрохода – $W_{\text{разг.}}$

Вклады значимых параметров и эффектов взаимодействий на величину затрат энергии ($W_{\text{разг.}}$) при разгоне электрохода приведены на рис. 3.

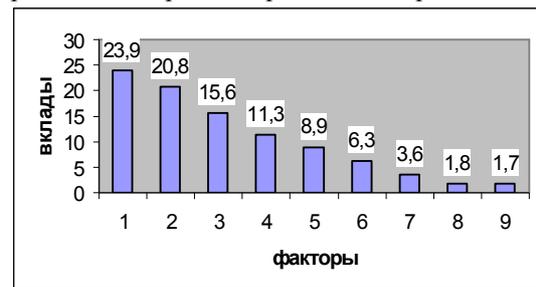


Рис. 3 – Вклады параметров и эффектов взаимодействий в показатель $W_{\text{разг.}}$

Обозначения на рис. 3 соответствуют: 1 – N_X ; 2 – C_{M23} ; 3 – C_{M17} ; 4 – C_{M20} ; 5 – C_{M16} ; 6 – C_{M18} ; 7 – N_XC_{M16} ; 8 – N_XC_{M17} ; 9 – C_{M21} .

Аналитическая зависимость для оценки затрат топлива на разгон электрохода $W_{\text{разг.}}$

$$W_{\text{разг.}} = 55,07 - 29,09N_X - 10,17C_{M20} + 8,56C_{M23} - 4,99C_{M17} - 3,48N_XC_{M23} + 2,87C_{M24}C_{M17} + 2,76N_XC_{M17} + 2,61C_{M20}C_{M23} - 2,31C_{M24}C_{M20}. \quad (5)$$

Скорость электрохода к концу разгона – $v_{\text{разг.}}$

Вклады значимых параметров и эффектов взаимодействий в величину скорости электрохода $v_{\text{разг.}}$ к концу разгона приведены на рис. 4.

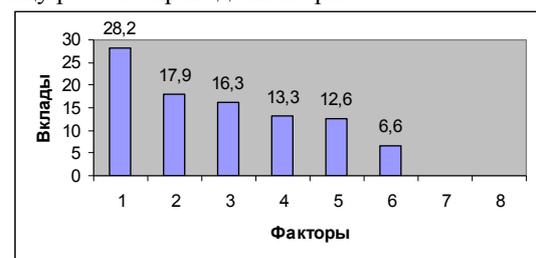


Рис. 4 – Влияние параметров и эффектов взаимодействий в показатель v_{max}

Обозначения на рис. 4 соответствуют: 1 – C_{M16} ; 2 – C_{M20} ; 3 – C_{M23} ; 4 – N_X ; 5 – C_{M17} ; 6 – $C_{M16}N_X$.

Аналитическая зависимость для оценки скорости электрохода $v_{разг.}$:

$$v_{разг.} = 0,652 - 0,053C_{M23} + 0,051C_{M24} - 0,04C_{M24}C_{M23} - 0,039C_{M20} + 0,037C_{M23}C_{M17} + 0,033C_{M17} + 0,033C_{M24}C_{M17} + 0,031C_{M20}C_{M23}. \quad (6)$$

Аналогично выявлены значимые параметры и значимые эффекты взаимодействий параметров по остальным показателям качества маневрирования. В частности, по показателям: $T_{торм.ГЭД}$; $T_{торм.СЭУ}$; $W_{торм.}$; $X1_{торм.}$; $P_{ГЭДmax}$; $T_{рев.}$.

Аналитические модели этих показателей, полученные с помощью метода активного планирования эксперимента, приведены ниже.

Продолжительность торможения гребных электродвигателей $T_{торм.ГЭД}$:

$$T_{торм.ГЭД} = 0,703 + 0,091C_{M16} - 0,104C_{G7} - 0,074C_{M20} + 0,093N_X + 0,066C_{G8} - 0,059C_{M16}C_{G7} - 0,058C_{M16}C_{M20} + 0,04C_{M16}C_{G8} + 0,045C_{G7}C_{M20} - 0,054C_{G7}N_X - 0,045C_{G7}C_{G8}. \quad (7)$$

Продолжительность торможения СЭУ:

$$T_{торм.СЭУ} = 2,056 - 0,897k2 + 0,25C_{M16} + 0,066C_{G8} - 0,263C_{G7} + 0,084k2C_{G7} - 0,119C_{M16}C_{G7} - 0,091C_{G8}C_{G7}, \quad (8)$$

(здесь $k2$ – коэффициент, определяющий интенсивность изменения управляющего сигнала.)

Затраты энергии на торможение $W_{торм.}$:

$$W_{торм.} = 25,545 - 13,64N_X + 1,26C_{M16} - 2,57C_{M20} + 4,04C_{M23} - 2,61C_{M17} - 0,79N_XC_{M16} + 1,26N_XC_{M20} - 1,99N_XC_{M23} + 1,7N_XC_{M17} - 0,83C_{M16}C_{M23} + 1,47C_{M20}C_{M23} + 1,04C_{M20}C_{M17}. \quad (9)$$

Выбег судна при торможении $X1_{торм.}$:

$$X1_{торм.} = 4,03 - 1,76N_X - 0,054C_{M16} - 0,21C_{M20} - 0,1C_{M23} - 0,12C_{M16}C_{M23} + 0,18C_{M20}C_{M23}. \quad (10)$$

Максимальная мощность гребных электродвигателей $P_{ГЭДmax}$:

$$P_{ГЭДmax} = 0,751 + 0,223C_{M16} - 0,052C_{G7} + 0,131C_{M23} - 0,076C_{M17} - 0,057C_{M20} + 0,033C_{M16}C_{M23} - 0,042C_{M16}C_{M20} - 0,032C_{M23}C_{M17} - 0,038C_{M17}C_{M20}. \quad (11)$$

Продолжительность реверса электрохода $T_{рев.}$:

$$T_{рев.} = 27,765 - 14,672N_X + 3,265C_{M23} - 2,891C_{M16} - 2,3N_XC_{M23} + 1,734N_XC_{M16} - 1,39C_{M23}C_{M17} - 1,33C_{M16}C_{M17} - 1,17C_{M20}C_{M23} + 1,08C_{M20}C_{M17}. \quad (12)$$

Обобщенные безразмерные параметры пропульсивных комплексов электроходов в аналитических моделях (3)-(12) – C_{G7} ; C_{G8} ; N_X ; N_M ; N_D ; C_{M16} ; C_{M17} ; C_{M20} ; C_{M23} ; C_{M24} ; C_{22} ; C_{65} ; C_{61} ; C_{21} ; $C_{\lambda 21}$ C_{RY} – рассчитываются по соотношениям [5]:

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

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

$$C_{M17} = \frac{b_M^2}{r_{2M}'^2}; \quad C_{M18} = \frac{c_M^2}{r_{2M}'^2} \alpha_0^2; \quad C_{M20} = \frac{\omega_{M0}}{\omega_{1MH}}; \quad C_{M21} = d_M^2;$$

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

$$C_{M24} = \sqrt{C_{M17} + C_{M18} + \frac{C_{M21}}{\beta_{M0}^2} + \frac{C_{M22}}{\beta_{M0}^2} + \frac{C_{M23}}{\beta_{M0}}};$$

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

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_{1MH} – 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_{M0} – вращающий момент ГЭД;

J_M – приведенные к валу ГЭД 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;

L – длина судна;

v_0 – скорость движения судна в установившемся режиме работы при номинальной мощности двигателей;

t – текущее, по ходу выполнения маневра, время.

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

Безразмерные параметры аналитических моделей (3)-(12) должны быть представлены, как было отмечено ранее, в нормированном виде. Нормирование производится по соотношению

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

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

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

Как отмечалось выше, аналитические модели позволяют уже на самых ранних стадиях проектирования оценивать основные показатели качества выполнения маневра и находить пути их улучшения.

Рассмотрим существующие возможности применения разработанных аналитических моделей

для оценки основных показателей качества маневрирования. Вместе с тем, оценим и погрешности предлагаемого приближенного метода расчета.

В качестве объекта исследования выбран проект судна с частотно-управляемыми гребными электродвигателями. Основные технические характеристики электрохода: 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 силовой установки входят: два дизель-генераторных агрегата, каждый из которых содержит дизель (приводной двигатель) 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, имеющих следующие основные расчетные параметры: мощность 1000 кВт; ток статора 1100 А; коэффициент мощности 0,835; вращающий момент 10670 Нм; угловая скорость вращения 93,67 с⁻¹.

Основные обмоточные данные ГЭД: активное сопротивление статора 0,00419 Ом; реактивное сопротивление статора 0,0879 Ом; приведенное активное сопротивление ротора 0,0359 Ом; приведенное реактивное сопротивление ротора 0,1319 Ом; коэффициент приведения сопротивлений 34,336; реактивное сопротивление намагничивания 1,503 Ом.

Расчет продолжительности разгона ($T_{\text{разг.}}$), выбега электрохода к концу разгона ($X1_{\text{разг.}}$), затрат энергии на разгон электрохода ($W_{\text{разг.}}$) и скорости судна к концу разгона ($v_{\text{разг.}}$) производится с использованием аналитических моделей (3), (4), (5) и (6). Обобщенные безразмерные параметры используются в них в нормированном виде.

Результаты расчетов для проектируемого электрохода:

– продолжительность разгона

$$T_{\text{разг.}} = 27,2 - 14,68N_X + 1,97C_{M23} + 1,72C_{M23}C_{M24} - 1,69C_{M20} - 1,59C_{M24} - 1,06C_{M24}C_{M20} - 0,94C_{M20}C_{M23} - 0,88N_XC_{M23} + 0,84N_XC_{M20} - 0,69C_{M24}C_{M17} = 27,2 - 14,68 \cdot 0,029 + 1,97 \cdot (-0,967) + 1,72 \cdot (-1,663) \cdot 1,13 - 1,69 \cdot 1,639 - 1,59 \cdot 1,797 - 1,06 \cdot 1,13 \cdot 0,97 - 0,94 \cdot 0,97 \cdot (-0,967) - 0,88 \cdot 0,029 \cdot (-0,967) + 0,84 \cdot 0,029 \cdot 0,97 - 0,69 \cdot 1,13 \cdot (-0,987) = 20,11;$$

(в абсолютных единицах времени $t = 20,11 \cdot 7,4 = 148,8$ с);

– относительные затраты энергии на разгон

$$W_{\text{разг.}} = 55,07 - 29,09N_X - 10,17C_{M20} + 8,56C_{M23} - 4,99C_{M17} - 3,48N_XC_{M23} + 2,87C_{M24}C_{M17} + 2,76N_XC_{M17} + 2,61C_{M20}C_{M23} - 2,31C_{M24}C_{M20} = 55,07 - 29,09 \cdot 0,029 - 10,17 \cdot 0,97 + 8,56 \cdot (-0,967) - 4,99 \cdot (-0,987) - 3,48 \cdot 0,029 \cdot (-0,967) + 2,87 \cdot 1,13 \cdot (-0,987) + 2,76 \cdot 0,029 \cdot (-0,987) + 2,61 \cdot 0,97 \cdot (-0,967) - 2,31 \cdot 1,13 \cdot 0,97 = 32,87;$$

– выбег электрохода

$$X1_{\text{разг.}} = 11,67 - 6,21N_X - 1,39C_{M20} + 0,56N_XC_{M20} + 0,55C_{M17} + 0,54N_XC_{M23} + 0,49C_{M24}C_{M17} + 0,47C_{M23}C_{M17} + 0,43C_{M24}C_{M20} - 0,4C_{M23} + 0,31C_{M24}C_{M23} = 11,67 - 6,21 \cdot 0,029 - 1,39 \cdot 0,97 + 0,56 \cdot 0,029 \cdot 0,97 + 0,55 \cdot (-0,987) + 0,54 \cdot 0,029 \cdot (-0,967) +$$

$$+ 0,49 \cdot 1,13 \cdot (-0,987) + 0,47 \cdot (-0,967) \cdot (-0,987) - 0,43 \cdot 1,13 \cdot 0,97 - 0,4 \cdot (-0,967) + 0,31 \cdot 1,13 \cdot (-0,967) = 10,4;$$

(в абсолютных единицах $X1 = 10,4 \cdot 51,7 = 537,7$ м);

– скорость судна к концу разгона

$$v_{\text{разг.}} = 0,652 - 0,053C_{M23} + 0,051C_{M24} - 0,04C_{M24}C_{M23} - 0,039C_{M20} + 0,037C_{M23}C_{M17} + 0,033C_{M17} + 0,033C_{M24}C_{M17} + 0,031C_{M20}C_{M23} = 0,652 - 0,053 \cdot (-0,967) + 0,051 \cdot 1,13 - 0,04 \cdot 1,13 \cdot (-0,967) - 0,039 \cdot 0,97 + 0,037 \cdot (-0,967) \cdot (-0,987) + 0,033 \cdot (-0,987) + 0,033 \cdot 1,13 \cdot (-0,987) + 0,031 \cdot 0,97 \cdot (-0,967) = 0,753;$$

(в абсолютных единицах $v = 0,753 \cdot 7 = 5,27$ м/с).

Для оценки погрешности, возникающей при использовании этого метода, проведено сравнение результатов расчетов показателей качества маневрирования гребной электроэнергетической установки в составе пропульсивного комплекса электроходов по предложенному приближенному и по точному (по полной математической модели [5]) методам. Эти результаты приведены в табл. 1. (В качестве примера, выше приведен численный расчет первых четырех показателей).

Таблица 1 – Оценка погрешности приближенного метода расчета

Показатели качества	Приближенный метод	Точный метод	Погрешность, %
1. Продолжительность разгона – $T_{\text{разг.}}$	20,11	18	11,7
2. Затраты энергии на разгон судна – $W_{\text{разг.}}$	32,87	30,39	8,1
3. Выбег электрохода при разгоне – $X1_{\text{разг.}}$	10,4	11,4	8,8
4. Скорость судна к концу разгона – $v_{\text{разг.}}$	0,753	0,823	8,5
5. Продолжительность торможения ГЭД – $T_{\text{торм.ГЭД}}$	0,65	0,66	1,5
6. Продолжительность торможения СЭУ – $T_{\text{торм.СЭУ}}$	2,748	3	8,4
7. Затраты энергии на торможение – $W_{\text{торм.}}$	21,4	19061	7,3
8. Выбег электрохода к концу торможения – $X1_{\text{торм.}}$	3,769	3,22	3,8
9. Максимальная мощность первичных двигателей – $P_{d\text{max}}$	0,852	0,9	5,3
10. Продолжительность реверса – $T_{\text{рев.}}$	21,456	23,5	8,7

Как следует из табл. 1, погрешности, получаемые при использовании приближенного метода, находятся в допустимых для решения динамических задач пределах.

Разработанные аналитические модели позволяют не только оценивать основные показатели качества выполнения маневра, но и находить пути их улучшения.

Проиллюструємо це применительно к маневру "разгон электрохода". Попытаемся добиться сокращения продолжительности разгона $T_{разг.}$ и выбега электрохода $X1_{разг.}$, не потеряв при этом в скорости судна $v_{разг.}$ к концу разгона.

Как следует из уравнений (3) и (4), на эти показатели наиболее существенно влияние оказывает параметр N_X – энерговооруженность электрохода, а затем – безразмерные параметры гребных электродвигателей $C_{M17}-C_{M24}$.

Влияние энерговооруженности (параметр N_X) однозначно: для сокращения $T_{разг.}$ и $X1_{разг.}$ следует увеличивать N_X . Если, к примеру, рассматриваемый электроход имеет средние значения параметров, то при увеличении N_X до предельного значения (с 0,13 до 0,20) продолжительность разгона сократится с 27,2 безразмерных единиц времени до 12,92 единиц, т.е. на 52,5%. Одновременно уменьшится относительный путь, пройденный электроходом к концу разгона – с 11,67 до 5,46 длин его корпуса, т.е. – на 53,2%. Характер влияния параметров гребных электродвигателей $C_{M17}-C_{M24}$ существенно сложнее, поскольку сильны эффекты взаимодействий этих параметров. Из уравнений (3)-(4) видно, что для достижения поставленной цели необходимо, в первую очередь, увеличить параметр C_{M20} и уменьшить C_{M23} . При одновременном предельном изменении этих параметров (при условии, что все остальные остаются неизменными) продолжительность разгона сократится с 27,2 до 24,48 (на 10%) безразмерных единиц времени, а выбег судна уменьшится с 11,67 до 10,68 его длин, т.е. на 8,5% (эти результаты получаются с учетом эффектов взаимодействий C_{M20} и C_{M23}). Скорость судна к концу разгона изменится мало, поскольку влияние параметров C_{M20} и C_{M23} и эффектов их взаимодействий на этот показатель компенсируют друг друга.

Таким образом, на этапах "эскизной" проработки вариантов гребных электрических установок будущих проектов, при сравнении различных вариантов конструкторских решений, на самых ранних стадиях разработок целесообразно пользоваться приближенным методом оценки основных показателей качества маневрирования. А уже на последующих этапах проектирования для расчета маневренных характеристик электроходов рекомендуется пользоваться уточненными методами расчета.

Выводы.

1. На начальных этапах проектирования сложных электромеханических систем, при ограниченном объеме технической информации для приближенной оценки основных показателей качества их функционирования целесообразно иметь простые, удобные в использовании методы оценки.

2. Предложен аналитический метод оценки. Гребная электрическая установка электрохода, при этом, рассмотрена в составе единого судового пропульсивного комплекса. Разработаны аналитические зависимости (аналитические модели) показателей качества маневрирования от безразмерных параметров пропульсивного комплекса.

3. Адекватность разработанных моделей подтверждена сравнением получаемых с их помощью

результатов с расчетами по точным математическим моделям.

4. Предложенные модели позволяют на этапах "эскизной" проработки вариантов проектов в условиях недостаточной информации прогнозировать маневренные свойства проектируемых пропульсивных комплексов и находить пути улучшения маневренных характеристик.

Список литературы

1. Power set-up aims at maximum flexibility // Lloyd's Ship Manag. [Lloyd's ship Manag. and Shipp. News Int.]. – 1995. 16, Crtuise and Ferry – P. 18.
2. Litzka Horst. Propulsion concepts for future generations of naval vessels / Horst Litzka // Germ. Marit. Ind. J. – 1994. 10. № 2. – P. 26-30.
3. Borase Jinseppe. Passenger ships with electric propulsion / Jinseppe Borase // Techno.mare.- Autom.nav. – 1994. 25. № 8. – P. 28-29.
4. Гилерович Ю. М. Перспективы развития гребных электрических установок / Ю. М. Гилерович // Судостроение. – 1977. – №4. – С. 51-54.
5. Яровенко В. А. Расчет и оптимизация переходных режимов пропульсивных комплексов электроходов / В. А. Яровенко – Одесса: Маяк, 1999. – 188 с.
6. Yarovenko Vladimir. Search for optimal solutions in designing electric vessels' propulsion complexes / Vladimir Yarovenko // Constanta Maritime University Annals. Constanta. – 2016. Year XVII, 25th issue, P. 133-138.
7. Яровенко В. А., Зарицкая Е. И. Системный подход в проектировании гребных электрических установок электроходов / В. А. Яровенко, Е. И. Зарицкая // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Електричні машини на електромеханічні перетворювачі енергії», Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – №5 (1114). С. 102-108.
8. Яровенко В. А., Зарицкая Е.И. Управление гребными двигателями электроходов на маневрах / В. А. Яровенко, Е. И. Зарицкая // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 11 (1183). – С.36-41.
9. 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.
10. Яровенко В. А. Расчет показателей качества работы силовой установки пропульсивного комплекса электрохода на циркуляции // Вісник Одеського державного морського університету. – Одеса : ОДМУ. – 1999. – № 3. – С. 185-195.

References (transliterated)

1. Power set-up aims at maximum flexibility // Lloyd's Ship Manag. [Lloyd's ship Manag. and Shipp. News Int.]. – 1995. – 16, Crtuise and Ferry – P. 18.
2. Litzka Horst. Propulsion concepts for future generations of naval vessels. *Germ. Marit. Ind. J.* 1994. 10. no. 2, pp. 26-30.
3. Borase Jinseppe. Passenger ships with electric propulsion *Techno.mare.- Autom.nav.* 1994. 25. no. 8, pp. 28-29.
4. Gilerovich Yu. M. Perspektivy razvitiya grebnykh elektricheskikh ustanovok [Prospects for the development of rowing electrical installations]. *Sudostroenie*. 1977. no. 4. pp. 51-54.
5. Yarovenko V. A. Raschet i optimizatsiya perekhodnykh rezhimov propul'sivnykh kompleksov elektrokhodov [Calculation and optimization of transient modes of propulsion of electric vessels]. Odessa: Mayak, 1999. 188 p.
6. Yarovenko Vladimir. Search for optimal solutions in designing electric vessels' propulsion complexes. *Constanta Maritime University Annals. Constanta*. 2016. Year XVII, 25th issue, pp. 133-138.
7. Yarovenko V. A., Zaritskaya E. I. Sistemnyy podkhod v proektirovani grebnykh elektricheskikh ustanovok elektrokhodov [A systematic approach to the design of rowing electrical installations of electric] *Visnik NTU «KhPI». Seriya «Elektrichni mashini na elektromekhanichni peretvoryuvachi energii»* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion"] Kharkiv : NTU "KhPI" Publ. 2015. no. 5 (1114). pp. 102-108.

8. Yarovenko V. A., Zaritskaya E. I. Upravlenie grebnymi dvigatelyami elektrokhodov na manevrakh [Control the propeller motors electric vessels on maneuvers] *Visnik NTU «KhPI». Seriya «Elektrichni mashini na elektromekhanichni peretvoryuvachi energii»* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion"] Kharkiv: NTU "KhPI" Publ. 2016. no. 11 (1183). pp. 36-41.
9. Zubarev Yu. A., Sobashnikov A. D., Yukhnovich V. A. Raschet sudovykh avtomatizirovannykh sistem metodom aktivnogo planirovaniya eksperimenta [The calculation of the ship automated systems by the method of active planning of the experiment] L.: Sudostroenie, 1976. 96 p.
10. Yarovenko V. A. Raschet pokazateley kachestva raboty silovoy ustanovki propulsivnogo kompleksa elektrokhoda na tsirkulyatsii [The calculation of the performance of the power plant complex propulsion of the ship in circulation] // *Visnyk Odes'koho derzhavnoho morskoho universytetu*. [Bulletin of ODMU] Odesa: ODMU. 1999. no. 3. pp. 185-195.

Поступила (received) 17.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Оцінка маневрених характеристик електроходів на початкових стадіях їх проектування / В. О. Яровенко, О. І. Зарицька, П. С. Черніков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – X. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 57–63. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2409-9295.

Оценка маневренных характеристик электроходов на начальных стадиях их проектирования / В. А. Яровенко, Е. И. Зарицкая, П. С. Черников // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – X. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 57–63. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2409-9295.

Evaluation of electric ships' maneuverability on the initial stages of their designing / V. A. Yarovenko, E. I. Zaritskaya, P. S. Chernikov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 1 (1223). – P. 57–63. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2409-9295.

«Сведения об авторах / About the Authors»

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

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

Yarovenko Vladimir Alekseevich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Odessa National Maritime University, Chair of the Department of operation of ship's electrical equipment and automation means, +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 автоматизації, (093)368-49-16; e-mail: zarickayalena74@mail.ru

Зарицкая Елена Игоревна, кандидат технических наук, доцент, Одесский национальный морской университет, доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматизации, (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 operation of ship's electrical equipment and automation means, +38 (093)368-49-16; e-mail: zarickayalena74@mail.ru

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

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