

В.А. Яровенко, П.С. Черников, Р.А. Варбанец, Е.И. Зарицкая

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРЕБНЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРОХОДОВ ПРИ РЕВЕРСИРОВАНИИ

*Метою роботи є пошук оптимальних законів управління гребними електродвигунами (ГЕД) суден з електрорухом. Критеріями оптимальності обрані показники, що характеризують маневрені властивості електрочодів. Методика. Пропорційний закон управління ГЕД не забезпечує потрібні маневрені властивості електрочодів. Оптимальні закони управління ГЕД, що мають забезпечити найкращі маневрені характеристики електрочодів, можуть бути знайдені при спільному розгляді гребної електроенергетичної установки, гребних гвинтів і корпусу судна. Результати. Запропоновано новий спосіб формування оптимальних законів управління. Виявлено характер цільових функцій і розроблено метод оптимізації. Проведено оптимізаційні розрахунки і знайдені оптимальні закони управління гребними електродвигунами при реверсі електрочодів. Оптимізація проведена за критеріями мінімуму гальмівного шляху і мінімуму витрат енергії. Проілюстровано ефективність використання запропонованих законів управління. Наукова новизна. Метод пошуку оптимальних законів керування побудовано за системним принципом. Це дозволяє знаходити закони управління гребними електродвигунами за кінцевим результатом – за показниками судна. Практична значимість. Запропоновані рекомендації можуть використовуватися як при проектуванні гребних електроенергетичних установок, так і при їх експлуатації. Для конкретного електрочоду, в залежності від показників якості маневрування, може бути обрано (із запропонованих) і закладено в систему керування найкращий закон управління гребними електродвигунами. Бібл. 9, табл. 4, рис. 3.*

*Ключові слова:* управління гребними електродвигунами електрочодів на маневрах, метод оптимізації, оптимальні закони управління.

*Целью работы является поиск оптимальных законов управления гребными электродвигателями (ГЭД) судов с электродвижением. Критериями оптимальности выбраны показатели, характеризующие маневренные свойства электрочодов. Методика. Пропорциональный закон управления ГЭД не обеспечивает нужные маневренные свойства электрочодом. Оптимальные законы управления ГЭД, обеспечивающие наилучшие маневренные характеристики электрочодов могут быть найдены при совместном рассмотрении гребной электроэнергетической установки, гребных винтов и корпуса судна. Результаты. Предложен новый способ формирования оптимальных законов управления. Вывявлен характер целевых функций и разработан метод оптимизации. Проведены оптимизационные расчеты и найдены оптимальные законы управления гребными электродвигателями при реверсе электрочодов. Оптимизация проведена по критериям минимума тормозного пути и минимума расхода энергии. Проиллюстрирована эффективность использования предлагаемых законов управления. Научная новизна. Метод поиска оптимальных законов управления построен по системному принципу. Это позволяет находить законы управления гребными электродвигателями по конечному результату – по показателям судна. Практическая значимость. Предложенные рекомендации могут использоваться как при проектировании гребных электроэнергетических установок, так и при их эксплуатации. Для конкретного электрочода, в зависимости от показателей качества маневрирования, может быть выбран (из предложенных) и заложен в систему регулирования наилучший закон управления гребными электродвигателями. Библ. 9, табл. 4, рис. 3.*

*Ключевые слова:* управление гребными электродвигателями электрочодов на маневрах, метод оптимизации, оптимальные законы управления.

**Актуальность задачи.** Отличительной особенностью судов с электродвижением является то, что маневренные режимы – разгон, торможение, реверс, выход на циркуляцию – являются для них основными эксплуатационными режимами работы. Высокая маневренность электрочодов является одним из основных качеств, обусловивших причину столь высокого интереса к применению современных систем электродвижения на судах и боевых кораблях. Неудивительно при этом, что вопросам надежности и безопасности выполнения маневренных операций уделяется особое внимание.

Результаты сравнительного анализа показывают, что суда с электродвижением обладают существенно лучшими маневренными характеристиками, чем суда с традиционными типами энергетических установок. Важнейшим маневром для электрочодов является реверс гребных электродвигателей. В частности, для большинства судов, обладающих энергетическими установками с непосредственной передачей вращающего момента первичных двигателей на гребные винты, процесс реверсирования носит затяжной характер

и продолжается 1-2 минуты. Продолжительность же реверса гребных электродвигателей (ГЭД) редко превышает 15-20 сек (например, для атомного электрочода «Арктика» время реверса с «полного вперед» на «полный назад», при положении ограничителя мощности на 100 %, составляет около 30 с). Сама процедура реверсирования двигателей внутреннего сгорания несоизмеримо сложнее по сравнению с реверсом ГЭД. Кроме того, не каждый реверс может быть успешным. А именно из-за запоздалого маневрирования, ведущего к дополнительному выбегу судна, происходит до 40 % столкновений судов. Таким образом, даже такое краткое сравнение показывает, что гребные электрические установки (ГЭУ) обеспечивают более высокую надежность и безопасность выполнения маневренных операций.

Одним из перспективных вариантов построения ГЭУ является система электродвижения на базе асинхронных частотно-управляемых гребных электродвигателей. В связи с этим, весьма актуальными являются вопросы совершенствования управления гребными

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

электродвигателями ГЭУ на маневрах. Причем, необходимость в оценке маневренных свойств электроходов и в поиске наилучших законов управления гребными электродвигателями на маневрах возникает как на начальных стадиях их проектирования, так и в процессе эксплуатации судов.

При поиске наилучших законов управления ГЭД в качестве критериев их оценки следует, в первую очередь, выбирать показатели, оценивающие эффективность работы самого судна, как «старшей» системы. Только так может быть обеспечен системный подход к выбору оптимальных законов управления гребными электродвигателями на маневрах.

**Состояние рассматриваемого вопроса.** Применительно к гребным электроэнергетическим установкам с частотно-регулируемыми ГЭД традиционно предлагается оптимальный закон управления, заимствованный из теории частотного управления общепромышленными электроприводами ( $\gamma\alpha = \text{const}$ ). Здесь  $\gamma$  – относительное напряжение  $\gamma = U/U_n$ ,  $\alpha$  – относительная частота  $\alpha = f/f_n$ . Однако, следует помнить, что рекомендуемый пропорциональный оптимальный закон управления получен применительно к «электрическим» показателям качества работы электродвигателей. При системном же подходе эти показатели отходят на второй план. Возникает необходимость в поисках тех законов управления, которые обеспечат наилучшие значения показателей качества маневрирования электрохода, с контролируемыми при этом (с заданными допусками) показателями работы и гребной электрической установки.

В соответствии с поставленной задачей, анализ работы гребных электрических установок на маневрах следует проводить в единстве со всеми составными частями пропульсивного комплекса электрохода, включающего в себя судовую электроэнергетическую установку (первичные двигатели, генераторы электрического тока, преобразователи электроэнергии, гребные электродвигатели), гребные винты, руль и корпус судна. Лишь в такой постановке можно провести обстоятельный анализ маневренных режимов работы, оценить маневренные свойства электрохода и найти оптимальные законы управления ГЭД, обеспечивающие наилучшие маневренные характеристики судна.

В работе [1] предприняты попытки отыскать оптимальные законы управления гребными электродвигателями электроходов при выполнении маневренных операций. Для этого была разработана математическая модель переходных режимов работы гребной электрической установки в составе единого судового пропульсивного комплекса. На основании модели разработаны алгоритмы расчета переходных режимов и предложен метод поиска оптимальных законов управления. Однако:

- при описании процессов, происходящих в тепловых двигателях гребной электроэнергетической установки, был принят ряд допущений, не позволяющих контролировать динамические показатели режимов их работы;
- математическое описание процессов, происходящих в синхронных генераторах, было построено на

основе векторной диаграммы генератора, что также не давало возможности в полной мере оценить их динамику, и приводило к определенным погрешностям при оценке динамических показателей работы ГЭУ;

- предложенный вид законов управления по напряжению, как показывают результаты анализа, не в полной мере удовлетворяет поставленным задачам.

Для поиска законов управления гребными электродвигателями, обеспечивающих с одной стороны – наилучшие значения показателей качества маневрирования, с другой – допустимые динамические нагрузки на гребную электрическую установку и на тепловые двигатели судовой электростанции, необходимо усовершенствовать математическую модель, уточнить вид и процедуру поиска оптимальных законов управления. Основными показателями качества маневрирования предлагается принять (как пример решения подобных задач) минимум тормозного пути судна или минимум затрат энергии (затрат топлива) на выполнение маневра. Выбор показателя определяется поставленными целями и условиями выполнения маневра.

**Цель данной статьи** – найти оптимальные законы управления гребными электродвигателями, обеспечивающие высокие маневренные свойства электроходов.

**Метод решения задачи.** В работе [2] предложена уточненная математическая модель переходных режимов гребных электроэнергетических установок электроходов в составе судовых пропульсивных комплексов. В ней:

- в качестве регуляторов скорости вращения тепловых двигателей рассмотрены издромные всережимные регуляторы непрямого действия; в качестве регуляторов напряжения синхронных генераторов рассматриваются комбинированные (по управляющему воздействию и по отклонению регулируемой величины) регуляторы;
- переходные процессы в регуляторах скорости вращения тепловых двигателей описаны с учетом жесткой и гибкой обратных связей, и с учетом работы системы распределения активной мощности (при параллельно работающих генераторных агрегатах);
- переходные процессы в синхронных генераторах представлены уравнениями Парка-Горева;
- в состав комбинированной системы автоматического регулирования напряжения синхронных генераторов включен контур регулирования распределения реактивной мощности (при параллельно работающих генераторных агрегатах).

Для придания общности результатам расчетов модель приведена к относительным единицам. В результате – выявлены критерии динамического подобия (безразмерные параметры) пропульсивных комплексов «тепловые двигатели – гребная электрическая установка – движители – руль – корпус судна». Найдены возможные диапазоны изменения их значений. Именно эти параметры определяют текущие, по ходу выполнения маневра, значения режимных показателей всех составных частей комплекса и напрямую влияют на численные значения показателей качества маневрирования. Для расчета маневренных режимов разработан пакет прикладных программ. Базовой

является программа, позволяющая рассчитывать текущие значения относительных режимных показателей.

Такой подход позволяет придать общность получаемым результатам – электроходы с равными значениями безразмерных параметров будут иметь соответственно одинаковые значения (в относительных единицах) показателей качества маневрирования.

В состав электроэнергетической установки входит несколько силовых контуров (по количеству гребных электродвигателей). Обычно их два – три. Управление каждым контуром (каждым ГЭД) осуществляется независимо от других с поста управления (ПУ), расположенного на мостике. При этом на преобразователь частоты формируются два управляющих сигнала: по относительной частоте  $\alpha$  и по относительному напряжению  $\gamma$ .

Предлагается формировать управляющие сигналы по относительной частоте  $\alpha = \alpha(T)$  и по относительному напряжению  $\gamma = \gamma(\alpha)$  в виде:

$$\alpha = \alpha_{prim} + K_1 (1 - \exp(-K_5 T)); \quad (1)$$

$$\gamma = K_2 \alpha + K_3 \alpha^2 + K_4 \alpha^3 + (1 - K_2 - K_3 - K_4) \alpha^4, \quad (2)$$

где  $\alpha_{prim}$  – начальное значение относительной частоты питающего ГЭД напряжения;  $T = \frac{v_0 t}{L}$  – безразмерное

время;  $v_0$  – скорость движения судна в установившемся режиме;  $L$  – длина судна;  $t$  – текущее время;  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$  – оптимизируемые коэффициенты.

Необходимость в начальной ненулевой  $\alpha_{prim}$  становится очевидной из сравнения (рис. 1) реверсивной характеристики гребного винта (кривая 2) с механическими характеристиками асинхронного ГЭД при обратном направлении вращения магнитного поля (кривые 1).

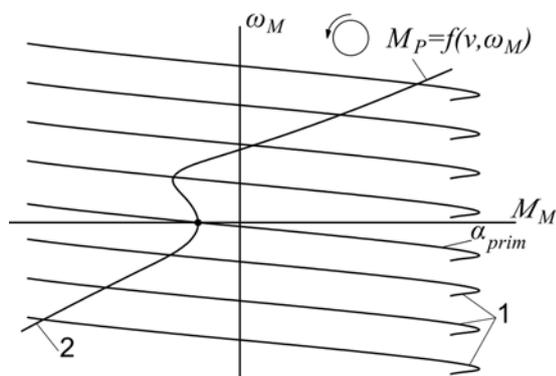


Рис. 1. Реверсивная характеристика гребного винта и механические характеристики ГЭД

Оптимизация законов управления должна осуществляться по темпу изменения относительной частоты (в зависимости от переключения рукоятки ПУ) и по относительному напряжению  $\gamma = \gamma(\alpha)$ .

В качестве критериев оптимальности выбраны:

- минимум тормозного пути –  $L_{Tmin}$ ;
- минимум затрат энергии на выполнение маневра –  $W_{min}$ .

Решаемые задачи относятся к области нелинейного программирования и заключаются в отыскании экстремумов целевой функции  $f(x)$  при заданных ограничениях  $g_j(x)$  в виде неравенств. Иными словами, необходимо минимизировать некоторую целевую функцию

$$f(x), x \in E^n \quad (3)$$

при  $p$  линейных ограничениях в виде неравенств

$$g_j(x) \geq 0, j = 1, \dots, p, \quad (4)$$

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

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

Объективный выбор оптимального варианта решений требует применения количественного комплексного критерия, учитывающего по каждому варианту судовой электроэнергетической установки совокупность разнородных показателей качества функционирования и соответствующих затрат.

В ходе оптимизационных расчетов могут решаться задачи как однокритериальной, так и многокритериальной оптимизации. В первом случае в качестве целевой функции выступает один из показателей качества. Во втором случае – целевая функция строится как

$$f(x) = \sum m_j f_j(x),$$

где  $m_j$  – весовой коэффициент  $j$ -го показателя качества.

В соответствии с поставленными в статье целями, в качестве критериев оптимальности приняты или минимум тормозного пути судна –  $L_{Tmin}$ , или минимум затрат энергии на выполнение маневра –  $W_{min}$ . Все остальные критерии отходят на задний план и учитываются в виде ограничений (4). Таким образом, в данной работе решались задачи однокритериальной оптимизации. Необходимости в оценке весовых коэффициентов нет.

Процедуры поиска оптимальных решений строились исходя из выявленного характера целевых функций. Как показали многочисленные расчеты, они являются многоэкстремальными, с неизвестным количеством точек локальных минимумов. Поэтому в основу алгоритмов поиска оптимальных решений были положены методы глобальной оптимизации.

Известно, что для решения реальных практических оптимизационных задач, существующие классические методы оптимизации [4-6], как правило, не подходят. Нужны специальные методы, учитывающие специфику и характер целевых функций.

Значения  $f(x)$  отыскиваются в результате расчетов маневров, описываемых сложной системой алгебраических и дифференциальных уравнений с многочисленными ограничениями в виде неравенств. Ставить задачу поиска первой и, тем более, второй производных целевых функций просто нереально.

Большое количество предварительных расчетов и их анализ показало, что целевые функции имеют вид крутых и вытянутых оврагов. Анализ существующих методов поиска глобальных оптимумов подобных целевых функций, дал основания заложить в основу разработанных алгоритмов глобальной оптимизации известный, хорошо зарекомендовавший себя, метод глобального случайного поиска – случайный мултистарт.

В чистом виде случайный мултистарт неэффективен из-за возможных повторных спусков к точкам локальных минимумов. Потому в алгоритм глобальной оптимизации была заложена комбинация одного

из пассивных методов покрытий – метода случайной сетки – с модифицированным методом туннельного алгоритма [1].

При разработке методов поиска локальных минимумов (внутренних процедур глобальной оптимизации) было опять же учтено, что целевые функции имеют явно выраженный овражный характер. Исходя из этого, алгоритмы поиска локальных минимумов создавались на базе комбинации методов локального спуска и способов овражного поиска. Наиболее эффективными для решения подобных задач оказались методы Пауэлла и Нелдера-Мида [7].

Овражный поиск локального оптимума осуществлялся следующим образом. Организовывались два локальных спуска из близлежащих начальных точек. Из каждой точки осуществлялись поиски промежуточных локальных минимумов  $f_1^*(x_1^*)$  и  $f_2^*(x_2^*)$ . Затем находилось новое направление  $s_0^*$ , проведенное из  $x_1^*$  в  $x_2^*$  (или наоборот, в зависимости от того, который из найденных промежуточных минимумов  $f_1^*(x_1^*)$  или  $f_2^*(x_2^*)$  больше), и вдоль него отыскивалось минимальное значение функции  $f_{opt.loc}(x^*)$ , которое и являлось локальным оптимумом.

Для решения задач минимизации используемые методы оптимизации сочетались с методом штрафных функций [8], что позволило свести задачу нелинейного программирования с ограничениями к эквивалентной последовательности задач без ограничений.

Поиск оптимальных законов управления осуществляется следующим образом. Каждый раз, после задания случайной начальной точки, производится расчет исследуемого маневра и находятся соответствующие значения критериев оптимальности (в частности – тормозного пути или затрат энергии на выполнение маневра). Затем, в соответствии с описанной процедурой движения к оптимуму, рассчитываются новые исходные данные (новые значения оптимизируемых параметров), вновь рассчитывается маневр и находятся соответствующие значения критериев оптимальности. Расчет заканчивается по достижению глобального оптимума.

Разработанный математический аппарат позволяет находить оптимальные законы управления гребными электродвигателями на маневрах.

Ниже рассмотрен поиск оптимальных законов управления гребными электродвигателями электроходов при реверсе. Было отмечено, что выбор показателей качества и соответственно вид целевой функции оптимизационного процесса определяется поставленными целями и условиями выполнения маневра. При работе в стесненных условиях реверс (качество реверсирования) напрямую влияет на безопасность выполнения маневренных операций. В этом случае основным критерием оптимальности является минимум тормозного пути электрохода  $L_{Tmin}$ . Если маневр осуществляется в «спокойных» условиях, поблизости нет других судов или иных объектов, величина тормозного пути электрохода отходит на второй план. В этом случае, в качестве критерия оптимальности имеет смысл принять минимум затрат энергии на выполнение маневра –  $W_{min}$ . И в одном, и в другом случае речь будет идти о задачах однокрите-

риальной оптимизации. Остальные показатели качества маневрирования учитываются в виде ограничений (вместе с уставками систем защит и ограничениями, обеспечивающими нормальное функционирование пропульсивного комплекса). Это в полной мере соответствует принципам системного подхода [3].

У электроходов частотно-управляемый этап реверса гребных электродвигателей начинается с момента времени, когда угловая скорость вращения ГЭД переходит через нулевое значение. Этот этап характеризуется интенсивным торможением электрохода. Следует иметь в виду, что гребные электродвигатели при этом работают в очень тяжелом режиме, испытывая большой момент сопротивления со стороны гребных винтов, существенно увеличивая тем самым нагрузку на все составные части гребной электроэнергетической установки.

Для каждого конкретного электрохода при выполнении маневренных операций оптимальные законы управления будут разными. В то же время, предложенный математический аппарат дает возможность найти оптимальные законы управления для достаточно большого класса судов. Для этого необходимо выявить те безразмерные параметры комплекса, которые наиболее значимо влияют на законы управления, найти диапазоны изменения их значений (охватив при этом как можно больший класс судов) и, проведя необходимые процедуры оптимизации, найти оптимальные законы управления для различных вариантов сочетания этих параметров. Иными словами – найти законы управления для целого класса судов.

Результаты анализа влияния начальных условий выполнения маневра и безразмерных параметров комплекса на критерии  $L_{Tmin}$ , и  $W_{min}$ , проведенного методами активного планирования экспериментов [9], дают основания рассматривать в качестве значимо влияющих параметров следующие:

- $v_{prim}$  – начальная скорость судна;
- $N_X$  – энерговооруженность электрохода

$$N_X = \frac{L \sum K_{Pj} P_{ej0}}{(m + \lambda_{11}) v_0^2}; \quad (5)$$

- $C_{M18}$ ,  $C_{M20}$  – безразмерные параметры частотно-управляемого ГЭД

$$C_{M18} = \frac{c_M^2}{r_{2M}^2} \alpha_0^2; \quad (6)$$

$$C_{M20} = \frac{\omega_{M0}}{\omega_{1Mn}}, \quad (7)$$

где  $P_{ej}$  и  $K_{Pj}$  – полезный упор гребного винта и его доля в суммарном упоре соответственно;  $m$  – масса судна;  $\lambda_{11}$  – присоединенные к судну массы воды вдоль его продольной оси;  $\omega_M$  – угловая скорость вращения ГЭД;  $\omega_{1Mn}$  – угловая частота вращения магнитного поля статора ГЭД;  $r'_{2M}$  – приведенное активное сопротивление ротора ГЭД;  $c_M = x_{0M} \tau_M$  – постоянный конструктивный коэффициент частотно-управляемого асинхронного ГЭД.

**Результаты работы.** Ниже, в табл.1, приведены результаты поисков оптимальных законов управления гребными электродвигателями, обеспечивающих минимальный тормозной путь электрохода –  $L_{Tmin}$ .

(Минимальный тормозной путь способствует безопасности выполнения маневренных операций).

Серии оптимизационных расчетов были проведены

для различных сочетаний значений значимых безразмерных параметров. Разные сочетания параметров это, по сути дела, не что иное, как разные электроходы.

Таблица 1

Сочетания значимых параметров и найденные оптимальные решения по критерию  $L_{Tmin}$  (при  $v_{prim} = 0,3$ )

| Вариант | Значения значимых параметров |           |           | $L_{Tclassic}$<br>о.е. | Оптимальные решения               |       |                                     |       |       | $L_{Tmin}$<br>о.е. | Эффективность<br>% |
|---------|------------------------------|-----------|-----------|------------------------|-----------------------------------|-------|-------------------------------------|-------|-------|--------------------|--------------------|
|         | $N_X$                        | $C_{M18}$ | $C_{M20}$ |                        | уравнения<br>$\alpha = \alpha(T)$ |       | уравнения $\gamma = \gamma(\alpha)$ |       |       |                    |                    |
|         |                              |           |           |                        | $K_1$                             | $K_5$ | $K_2$                               | $K_3$ | $K_4$ |                    |                    |
| 1       | 0,12                         | 15,7      | 0,88      | 0,43                   | 0,57                              | 7,03  | 0,99                                | 0,26  | 1,35  | 0,36               | 16,3               |
| 2       | 0,165                        | 15,7      | 0,88      | 0,403                  | 0,57                              | 7,59  | 1,17                                | 0,22  | 1,28  | 0,33               | 18,1               |
| 3       | 0,21                         | 15,7      | 0,88      | 0,365                  | 0,56                              | 6,75  | 1,02                                | 0,27  | 1,32  | 0,31               | 15,1               |
| 4       | 0,12                         | 43,9      | 0,88      | 0,437                  | 0,57                              | 6,98  | 1,32                                | -0,19 | 1,33  | 0,35               | 19,9               |
| 5       | 0,165                        | 43,9      | 0,88      | 0,406                  | -                                 | -     | -                                   | -     | -     | -                  | -                  |
| 6       | 0,21                         | 43,9      | 0,88      | 0,369                  | 0,57                              | 6,22  | 1,34                                | -0,19 | 1,3   | 0,31               | 16                 |
| 7       | 0,12                         | 72        | 0,88      | 0,444                  | 0,6                               | 6,89  | 1,19                                | 0,2   | 0,89  | 0,35               | 21,2               |
| 8       | 0,165                        | 72        | 0,88      | 0,412                  | 0,57                              | 7,14  | 1,35                                | 0,106 | 1,3   | 0,33               | 19,9               |
| 9       | 0,21                         | 72        | 0,88      | 0,373                  | 0,6                               | 6,2   | 1,2                                 | 0,2   | 0,87  | 0,3                | 19,6               |
| 10      | 0,12                         | 15,7      | 0,925     | 0,403                  | 0,6                               | 6,28  | 1,2                                 | 0,2   | 0,99  | 0,32               | 20,6               |
| 11      | 0,165                        | 15,7      | 0,925     | 0,378                  | 0,6                               | 6,12  | 1,85                                | 0,24  | 1,33  | 0,3                | 20,6               |
| 12      | 0,21                         | 15,7      | 0,925     | 0,345                  | 0,6                               | 6,6   | 1,17                                | 0,26  | 1,35  | 0,28               | 18,8               |
| 13      | 0,12                         | 43,9      | 0,925     | 0,407                  | 0,62                              | 6,14  | 1,2                                 | 0,19  | 0,74  | 0,32               | 21,4               |
| 14      | 0,165                        | 43,9      | 0,925     | 0,381                  | 0,619                             | 6,56  | 1,28                                | 0,2   | 1,38  | 0,3                | 21,3               |
| 15      | 0,21                         | 43,9      | 0,925     | 0,348                  | 0,61                              | 6,6   | 1,18                                | 0,22  | 1,05  | 0,28               | 19,5               |
| 16      | 0,12                         | 72        | 0,925     | 0,412                  | 0,63                              | 7,54  | 1,19                                | 0,21  | 0,95  | 0,31               | 24,8               |
| 17      | 0,165                        | 72        | 0,925     | 0,385                  | 0,63                              | 6,49  | 1,2                                 | 0,2   | 0,93  | 0,3                | 22,1               |
| 18      | 0,21                         | 72        | 0,925     | 0,351                  | 0,63                              | 6,43  | 1,2                                 | 0,2   | 0,93  | 0,28               | 20,2               |
| 19      | 0,12                         | 15,7      | 0,97      | 0,38                   | 0,64                              | 6,46  | 1,19                                | 0,2   | 0,86  | 0,28               | 26,3               |
| 20      | 0,165                        | 15,7      | 0,97      | 0,358                  | 0,63                              | 6,48  | 0,96                                | 0,26  | 1,33  | 0,26               | 27,4               |
| 21      | 0,21                         | 15,7      | 0,97      | 0,328                  | 0,639                             | 6,487 | 0,968                               | 0,263 | 1,332 | 0,261              | 20,4               |
| 22      | 0,12                         | 43,9      | 0,97      | 0,382                  | 0,64                              | 6,57  | 1,18                                | 0,22  | 1,05  | 0,28               | 26,7               |
| 23      | 0,165                        | 43,9      | 0,97      | 0,361                  | 0,65                              | 6,47  | 1,2                                 | 0,2   | 0,86  | 0,27               | 25,2               |
| 24      | 0,21                         | 43,9      | 0,97      | 0,33                   | 0,65                              | 6,17  | 1,19                                | 0,2   | 0,85  | 0,26               | 21,2               |
| 25      | 0,12                         | 72        | 0,97      | 0,386                  | 0,65                              | 5,82  | 1,36                                | 0,2   | 0,76  | 0,29               | 24,9               |
| 26      | 0,165                        | 72        | 0,97      | 0,364                  | 0,65                              | 5,81  | 1,36                                | 0,195 | 0,74  | 0,28               | 23,1               |
| 27      | 0,21                         | 72        | 0,97      | 0,332                  | 0,656                             | 5,886 | 1,365                               | 0,192 | 0,745 | 0,258              | 22,3               |

В табл. 1 приведена небольшая часть (для примера) возможных сочетаний параметров. Варьирование по каждому параметру проводилось на трех (минимальном, среднем и максимальном) уровнях. Для всех сочетаний отыскивались оптимальные законы управления по алгоритму, описанному выше. (Подобные таблицы составлены и для других начальных значений скорости движения судна  $v_{prim}$ . Для них также найдены оптимальные решения).

Здесь же, в табл.1, для оценки эффективности проведенных оптимизационных расчетов, приведены значения критерия  $L_{Tmin}$ , полученные при управлении ГЭД по традиционно рекомендуемому для гребных электроприводов «классическому» закону  $\gamma / \alpha = const$ . Это – графа  $L_{Tclassic}$ . Сравнение полученных результатов (см. последнюю графу табл.1) наглядно демонстрирует эффективность использования рассчитанных законов оптимального управления.

Результаты оптимизации удобно представить в графическом виде. В качестве примера, на рис.2

приведены зависимости  $\alpha = \alpha(T)$ ,  $\gamma = \gamma(T)$  и  $\gamma = \gamma(\alpha)$  для первых трех вариантов сочетания параметров (для трех электроходов). Анализ результатов расчетов показывает, что переход к оптимальному (по  $L_{Tmin}$ ) управлению гребными электродвигателями позволяет существенно сократить тормозной путь электрохода. В зависимости от конкретного судна (от конкретных сочетаний параметров комплекса) это сокращение находится в диапазоне от 15 % до 27 %.

Полученные результаты (в аналитическом виде – коэффициенты оптимальных законов управления  $\alpha = \alpha(T)$  и  $\gamma = \gamma(\alpha)$  в табл. 1 и в графической интерпретации – рис. 2) позволяют для любого электрохода рассматриваемого класса назначить законы управления ГЭД, обеспечивающие выполнение маневра «реверс» с минимальным тормозным путем. Если безразмерные параметры электрохода отличаются от приведенных в таблицах, можно воспользоваться любым методом интерполяции.

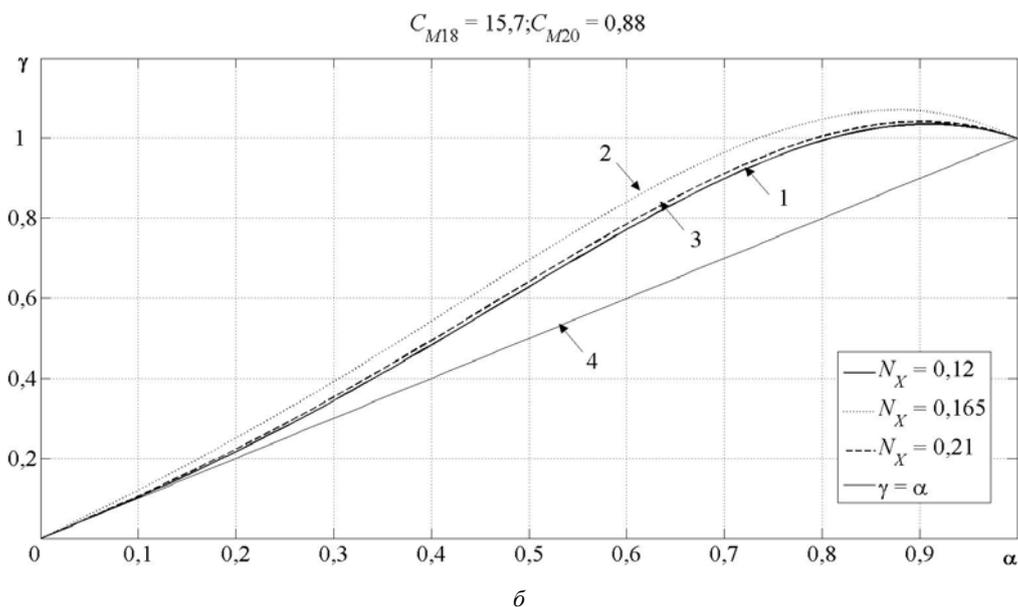
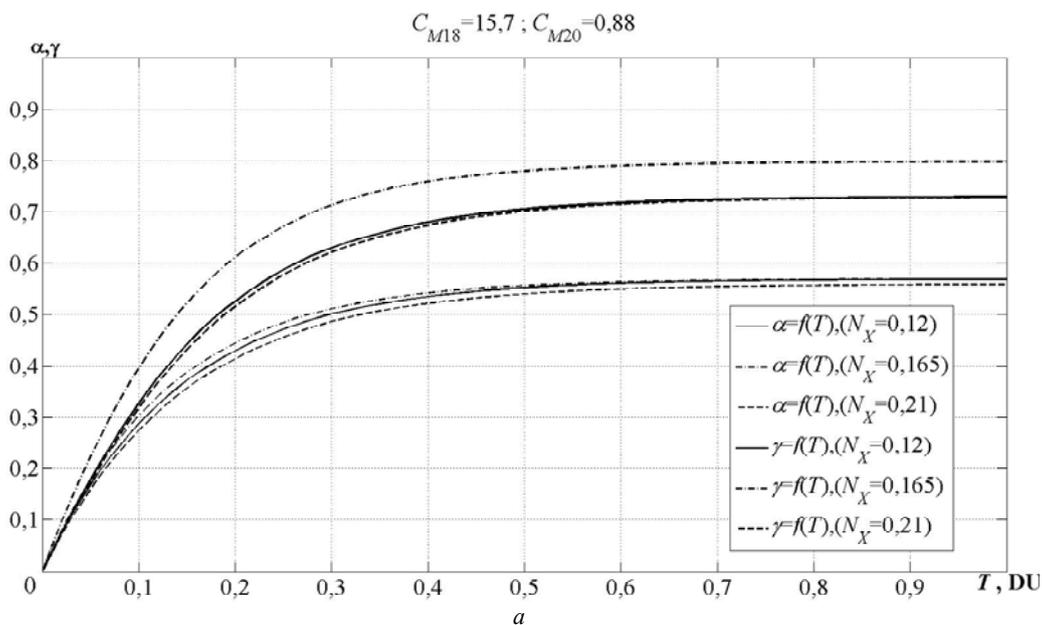


Рис. 2. Оптимальные законы управления по критерию  $L_{Tmin}$  ( $v_{prim} = 0,3$ )  
 $a - \alpha, \gamma = f(T)$ ,  $b - \gamma = f(\alpha)$

Если маневрирование осуществляется в нестесненной акватории, при отсутствии поблизости других судов, в качестве критерия оптимальности имеет смысл принять минимум затрат энергии на выполнение маневра –  $W_{min}$ . Вероятнее всего, законы управления при этом будут иными. Мы попытались их отыскать.

В соответствии с проведенными исследованиями, результаты которых приведены в [9], значимо влияющими параметрами и по этому критерию оптимальности (с уровнем вклада – не менее 10 %) являются  $v_{prim}$ ,  $N_x$ ,  $C_{M18}$ ,  $C_{M20}$ . Часть вариантов сочетаний этих параметров и найденные оптимальные решения (и значения  $W_{classic}$ , полученные при классическом  $\gamma / \alpha = const$  законе управления – для оценки эффективности оптимизации) приведены в табл. 2.

Эти законы управления также могут быть графически проиллюстрированы аналогично тому, как это было выполнено применительно к оптимальному

управлению по критерию минимума тормозного пути. Эффективность (по затратам энергии) предлагаемого управления находится в диапазоне 14 – 34 %.

Полученные результаты могут быть полезными на самых начальных стадиях проектирования гребных электроэнергетических установок. Появляется возможность уже на этих этапах оценивать маневренные характеристики будущих электроходов. Полезными они могут быть и для судов находящихся в эксплуатации. Для конкретного электрохода, в соответствии с поставленными целями может быть выбран и заложен в систему регулирования наилучший закон управления гребными электродвигателями.

В качестве примера рассмотрим проект конкретного электрохода. Основные его характеристики, необходимые для расчета значимо влияющих безразмерных параметров  $N_x$ ,  $C_{M18}$ ,  $C_{M20}$ , приведены в табл. 3.

Таблица 2

Сочетания значимых параметров и найденные оптимальные решения по критерию  $W_{\min}$  ( $v_{prim} = 0,3$ )

| Вариант | Значения значимых параметров, о.е. |           |           | $W_{classics}$ о.е. | Оптимальные решения            |       |                                     |         |       | $W_{\min}$ , о.е. | Эффект, % |
|---------|------------------------------------|-----------|-----------|---------------------|--------------------------------|-------|-------------------------------------|---------|-------|-------------------|-----------|
|         | $N_X$                              | $C_{M18}$ | $C_{M20}$ |                     | уравнения $\alpha = \alpha(T)$ |       | уравнения $\gamma = \gamma(\alpha)$ |         |       |                   |           |
|         |                                    |           |           |                     | $K_1$                          | $K_5$ | $K_2$                               | $K_3$   | $K_4$ |                   |           |
| 1       | 0,12                               | 15,7      | 0,88      | 4,235               | 0,601                          | 4,745 | 1,245                               | -0,075  | 0,092 | 3,583             | 15,4      |
| 2       | 0,165                              | 15,7      | 0,88      | 3,527               | 0,590                          | 1,052 | 1,117                               | 0,092   | 0,721 | 2,993             | 15,1      |
| 3       | 0,21                               | 15,7      | 0,88      | 2,92                | 0,576                          | 6,149 | 1,231                               | 0,014   | 1,351 | 2,522             | 13,6      |
| 4       | 0,12                               | 43,9      | 0,88      | 4,41                | 0,591                          | 1,432 | 1,363                               | 0,147   | 1,451 | 3,549             | 19,5      |
| 5       | 0,165                              | 43,9      | 0,88      | 3,573               | 0,526                          | 4     | 1,31                                | 0,378   | 2,07  | 2,774             | 22,4      |
| 6       | 0,21                               | 43,9      | 0,88      | 3,063               | 0,526                          | 4,33  | 1,31                                | 0,378   | 2,07  | 2,36              | 23        |
| 7       | 0,12                               | 72        | 0,88      | 4,59                | 0,569                          | 4,5   | 1,397                               | 0,199   | 1,106 | 3,492             | 23,9      |
| 8       | 0,165                              | 72        | 0,88      | 3,74                | 0,575                          | 4,507 | 1,367                               | 0,193   | 1,092 | 2,937             | 21,5      |
| 9       | 0,21                               | 72        | 0,88      | 3,1                 | 0,53                           | 5,1   | 1,31                                | 0,38    | 2,07  | 2,36              | 23,9      |
| 10      | 0,12                               | 15,7      | 0,925     | 4,083               | 0,615                          | 5,97  | 1,239                               | -0,0007 | 0,738 | 3,372             | 17,4      |
| 11      | 0,165                              | 15,7      | 0,925     | 3,416               | 0,662                          | 1,421 | 1,304                               | 0,154   | 1,468 | 2,824             | 17,3      |
| 12      | 0,21                               | 15,7      | 0,925     | 2,836               | 0,5                            | 5,31  | 1,216                               | 0,4     | 2,9   | 2,29              | 19,3      |
| 13      | 0,12                               | 43,9      | 0,925     | 4,247               | 0,631                          | 1,433 | 1,375                               | 0,159   | 1,448 | 3,335             | 21,5      |
| 14      | 0,165                              | 43,9      | 0,925     | 3,458               | 0,53                           | 3,98  | 1,31                                | 0,328   | 2,17  | 2,3               | 33,5      |
| 15      | 0,21                               | 43,9      | 0,925     | 2,97                | 0,53                           | 4,43  | 1,31                                | 0,38    | 2,07  | 2,3               | 22,6      |
| 16      | 0,12                               | 72        | 0,925     | 4,417               | 0,635                          | 6,181 | 1,334                               | 0,131   | 1,251 | 3,273             | 25,9      |
| 17      | 0,165                              | 72        | 0,925     | 3,62                | 0,633                          | 6,74  | 1,249                               | 0,005   | 1,323 | 2,764             | 23,6      |
| 18      | 0,21                               | 72        | 0,925     | 3,00                | 0,636                          | 6,669 | 1,36                                | 0,131   | 1,161 | 2,354             | 21,5      |
| 19      | 0,12                               | 15,7      | 0,97      | 3,93                | 0,633                          | 3,976 | 1,276                               | 0,058   | 1,529 | 3,199             | 18,6      |
| 20      | 0,165                              | 15,7      | 0,97      | 3,31                | 0,642                          | 2,696 | 1,224                               | 0,011   | 1,251 | 2,696             | 18,5      |
| 21      | 0,21                               | 15,7      | 0,97      | 2,843               | 0,62                           | 4,87  | 1,22                                | 0,28    | 1,56  | 2,27              | 20,2      |
| 22      | 0,12                               | 43,9      | 0,97      | 4,08                | 0,658                          | 8,523 | 1,053                               | -0,006  | 1,48  | 3,189             | 21,8      |
| 23      | 0,165                              | 43,9      | 0,97      | 3,35                | 0,666                          | 5,426 | 1,285                               | 0,036   | 0,56  | 2,677             | 20,1      |
| 24      | 0,21                               | 43,9      | 0,97      | 2,873               | 0,57                           | 4,45  | 1,3                                 | 0,586   | 1,03  | 2,24              | 22        |
| 25      | 0,12                               | 72        | 0,97      | 4,235               | 0,666                          | 4,546 | 1,417                               | -0,028  | 0,775 | 3,16              | 25,4      |
| 26      | 0,165                              | 72        | 0,97      | 3,492               | 0,56                           | 4     | 1,31                                | 0,33    | 2,17  | 2,61              | 25,3      |
| 27      | 0,21                               | 72        | 0,97      | 2,91                | 0,47                           | 3,16  | 1,38                                | 0,46    | 2,48  | 2,16              | 25,8      |

Таблица 3

Основные характеристики электрохода

|  |                         |
|--|-------------------------|
| Длина судна по ватерлинии, $L$   | 160 м                   |
| Скорость судна в установившемся режиме, $v_0$                              | 22 узла                 |
| Масса судна, $m$   | 33540 т                 |
| Суммарный упор винтов, $\sum K_{pj} P_{ej0}$                               | 6250 т·м/с <sup>2</sup> |
| Присоединенные к судну массы воды вдоль его продольной оси, $\lambda_{11}$ | 0,11 т                  |
| Угловая скорость вращения ГЭД, $\omega_M$                                  | 120 об/мин              |
| Угловая частота вращения магнитного поля статора ГЭД, $\omega_{1Mn}$       | 124 об/мин              |
| Постоянный конструктивный коэффициент, $c_M$                               | 0,423 Ом                |
| Приведенное активное сопротивление ротора ГЭД, $r'_{2M}$                   | 0,0639 Ом               |

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

Таблица 4

Значения безразмерных параметров электрохода

| Параметр  | Численные значения параметров |
|-----------|-------------------------------|
| $N_X$     | 0,21                          |
| $C_{M18}$ | 43,9                          |
| $C_{M20}$ | 0,97                          |

Для этого сочетания параметров – для этого электрохода – оптимальным законом управления гребными электродвигателями, обеспечивающим минимальный тормозной путь  $L_{T\min}$ , будет вариант 24 из табл. 1. А именно:

$$\alpha = 0,1 + 0,65 (1 - \exp(-6,17 T));$$

$$\gamma = 1,19 \alpha + 0,2 \alpha^2 + 0,85 \alpha^3 - 1,24 \alpha^4.$$

Именно эти законы управления относительной частотой  $\alpha$  и относительным напряжением  $\gamma$  рекомендуется закладывать в систему управления гребными электродвигателями, если необходимо обеспечить минимальный тормозной путь электрохода при реверсе. При этом он составит 0,26 длин судна, или в абсолютных единицах – 41,6 м.

Если же применять традиционный пропорциональный закон управления, то тормозной путь соста-

вит 0,33 длин судна, или в абсолютных единицах – 52,8 м. Таким образом, эффективность применения рекомендуемого оптимального закона управления составляет 21,2 %.

Полученные результаты могут быть проиллюстрированы графически. На рис. 3 приведены кривые изменения во времени относительной частоты  $\alpha = f(T)$ ,

и относительного напряжения  $\gamma = f(T)$  (рис. 3,а), а также зависимости (рис. 3,б) оптимального закона управления  $\gamma = f(\alpha)$  при реверсировании ГЭД электрохода, движущегося на малом ходу (при начальной скорости  $v_{prim} = 0,3$ ) и пропорциональный (для сравнения с оптимальным) закон управления  $\gamma_0 = f(\alpha)$ .

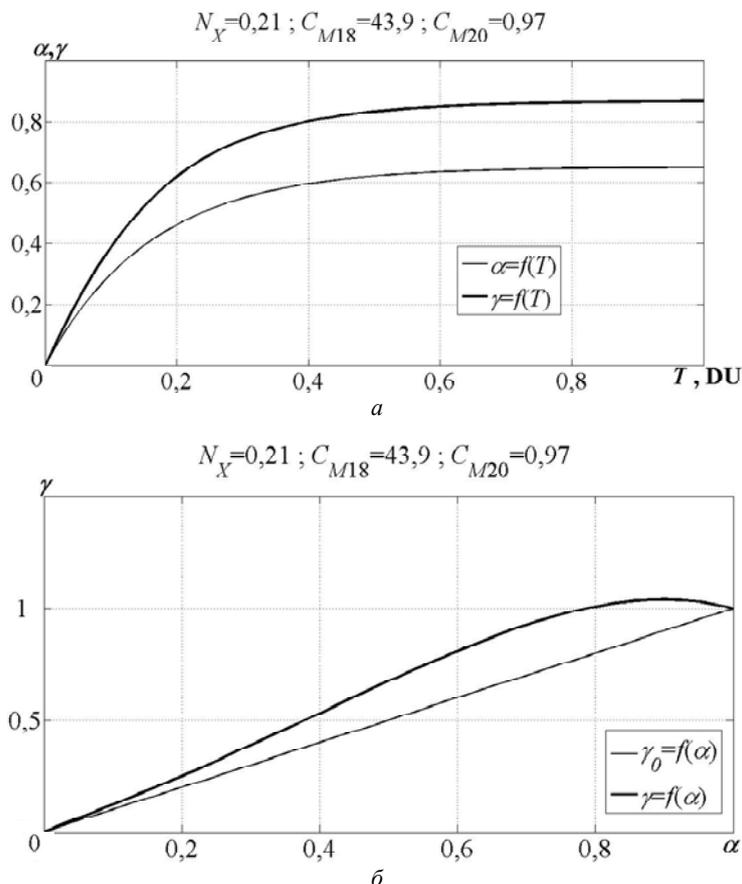


Рис. 3. Оптимальные законы управления (для проекта электрохода) по критерию  $L_{Tmin}$  (при  $v_{prim} = 0,3$ ):  
а –  $\alpha, \gamma = f(T)$ , б –  $\gamma = f(\alpha)$

Если реверсирование осуществляется в нестандартных условиях и целесообразно обеспечить минимум расхода энергии, то оптимальным законом управления данного электрохода будет тот же вариант 24, но уже из табл. 2. Законы управления в этом случае:

$$\alpha = 0,1 + 0,57 (1 - \exp(-4,45 T));$$

$$\gamma = 1,3 \alpha + 0,586 \alpha^2 + 1,03 \alpha^3 - 1,916 \alpha^4.$$

При управлении по этим законам расход энергии сокращается по сравнению классическим вариантом с 2,873 до 2,24 относительных единиц.

При необходимости законы могут быть уточнены. Для этого необходимо подставить в математическую модель численные значения безразмерных параметров комплекса и рассчитать с помощью разработанного метода оптимальный закон управления (теперь уже уточненный) при соответствующем критерии оптимальности. Однако, это целесообразно делать уже на более поздних этапах проектирования, при наличии более полной информации о проектируемом судне.

#### Выводы.

1. Установлено, что традиционные принципы построения оптимальных законов управления частотно-

управляемыми асинхронными электродвигателями электроходов не позволяют получить максимальной отдачи от гребной электроэнергетической установки. Предложен новый способ формирования оптимальных законов, в основе которого заложен системный принцип.

2. Выявлен характер целевых функций, разработан метод оптимизации. Предложена процедура оптимизационных расчетов.

3. Проведены оптимизационные расчеты и найдены оптимальные законы управления гребными электродвигателями при реверсе электроходов. Оптимизация проведена по критериям минимума тормозного пути и минимума расхода энергии.

4. Проиллюстрирована эффективность использования предлагаемых законов управления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яровенко В.А. Расчет и оптимизация переходных режимов пропульсивных комплексов электроходов. – Одесса: «Маяк», 1999. – 188 с.
2. Яровенко В.А., Черников П.С. Метод расчета переходных режимов гребных электроэнергетических установок

- электроходов // Электротехника і електромеханіка. – 2017. – №6. – С. 32-41. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.05.
3. Сухарев А.Г., Тимохов А.В., Федоров В.В. Курс методов оптимизации: Учеб. пособие. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2005. – 368 с.
  4. Bonnans J.-F., Gilbert J.C., Lemarechal C., Sagastizábal C.A. Numerical optimization: theoretical and practical aspects. – 2nd Edition. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – 494 p. doi: 10.1007/978-3-662-05078-1.
  5. Fletcher R. Practical Methods of Optimization. – Wiley, 2000. – 450 p. doi: 10.1002/9781118723203.
  6. Antoniou A., Lu W.-S. Practical optimization. Algorithms and engineering applications. – Springer, 2007. – 675 p.
  7. Floudas C.A., Pardalos P.M. Encyclopedia of optimization. – 2nd Edition. – Springer, 2009. – 4646 p. doi: 10.1007/978-0-387-74759-0.
  8. Пантелеев А.В., Легова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах: Учеб. пособие. – 3-е изд., стереотипное. – М.: Высшая школа, 2008. – 544 с.
  9. Черников П.С., Яровенко В.А., Зарицкая Е.И. Влияние параметров электроходов на показатели качества работы электроэнергетических установок при маневрировании // Вісник НТУ «ХП». Серія «Електричні машини та електромеханічне перетворювання енергії». – 2018. – №5(1281). С. 46-54.

#### REFERENCES

1. Yarovenko V.A. *Raschet i optimizatsiia perekhodnykh rezhimov propul'sivnykh kompleksov elektrokhodov* [Calculation and optimization of transient regimes of propulsion complexes of electric vessels]. Odessa, Mayak Publ., 1999. 188 p. (Rus).
2. Yarovenko V.A., Chernikov P.S. A calculation method of transient modes of electric ships' propelling electric plants. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.6, pp. 32-41. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.05. (Rus).
3. Sukharev A.G., Timokhov A.V., Fedorov V.V. *Kurs metodov optimizatsii* [Course of optimization methods]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 368 p. (Rus).
4. Bonnans J.-F., Gilbert J.C., Lemarechal C., Sagastizábal C.A. *Numerical optimization: theoretical and practical aspects*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 494 p. doi: 10.1007/978-3-662-05078-1.
5. Fletcher R. *Practical Methods of Optimization*. Wiley, 2000. 450 p. doi: 10.1002/9781118723203.
6. Antoniou A., Lu W.-S. *Practical optimization. Algorithms and engineering applications*. Springer, 2007. 675 p.
7. Floudas C.A., Pardalos P.M. *Encyclopedia of optimization*. Springer, 2009. 4646 p. doi: 10.1007/978-0-387-74759-0.
8. Panteleev A.V., Letova T.A. *Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh* [Optimization methods in examples and problems]. Moscow, High school Publ., 2008. 544 p. (Rus).
9. Chernikov P.S., Yarovenko V.A., Zaritskaya E.I. Influence of electric ships' parameters on quality indices of electric power plants' performance at maneuvers. *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: «Electric machines and electromechanical energy conversion»*, 2018, no.5(1281), pp. 46-54. (Rus).

Поступила (received) 31.07.2018

Яровенко Владимир Алексеевич<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Черников Павел Сергеевич<sup>1</sup>, ст. преподаватель,  
Варбанец Роман Анатольевич<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Зарицкая Елена Игоревна<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
<sup>1</sup> Одесский национальный морской университет,  
65007, Одесса, ул. Мечникова, 34,  
тел/phone +380 50 5980683,  
e-mail: yarovenko@3g.ua, chernikov@onmu.odessa.ua,  
roman.varbanets@gmail.com, zarickayalena@ukr.net

V.A. Yarovenko<sup>1</sup>, P.S. Chernikov<sup>1</sup>, R.A. Varbanets<sup>1</sup>,  
E.I. Zaritskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Odessa National Maritime University,  
34, Mechnikova Str., Odessa, 65007, Ukraine.

#### Optimal control of the electric ships' propulsion motors during reversal.

**Introduction.** Reliability and safety of electric ships' maneuverability depends on the maneuvering characteristics of their propulsion motors (PM). Therefore, the issues of improving the process of controlling propulsion motors at maneuvers are topical. The aim of this paper is to find the optimal laws of control. The indicators estimating electric ships' maneuvering properties are chosen as criteria of optimality. **Methodology.** A proportional control law is traditionally used in electrical propelling plants with frequency-controlled PM. However, it does not provide the necessary maneuvering characteristics to the electric ships, since it does not take into account the process of the vessel's movement. To search for the optimal control laws of propulsion motors at maneuvers, the electrical propulsion plant is considered in unity with all the components of the ship's propulsion complex. The dimensionless parameters of the complex are revealed from the mathematical model of the transient modes of its operation. They determine the numerical values of the optimality criteria. Control signals are formed by frequency and voltage. A method for the formation of optimal control laws is proposed. The nature of the target functions is revealed and a special optimization method is developed. A minimum of the braking distance and a minimum of energy spent on maneuvering are taken as criteria of optimality. **Results.** The parameters of the complexes that significantly affect the optimality criteria are revealed. For various combinations of the values of these parameters, optimization calculations have been carried out and the optimal control laws of the propulsion motors during electric ships' reversal have been found. Optimization is carried out by the criterion of the minimum of the braking distance and by the criterion of minimum energy consumption. The results are presented in an analytical form and in a graphical form. The effectiveness of the proposed control laws is illustrated. **Scientific novelty.** The method of searching for the optimal control laws of the propulsion motors is constructed according to the system principle. This allows us to find the control laws of the propulsion motors on the final result – on the indicators of electric ships' maneuverability. The proposed recommendations cover a wide class of vessels with electric motion. **Practical value.** The proposed optimal control laws for propulsion motors can be used both in the design of propulsion power plants and in their operation. The best control law can be selected and incorporated into the control system for any particular electric ship of the considered class, depending on the quality of maneuvering. In particular, the optimal control law for propulsion motors during reversal providing electric ship's minimum braking distance or minimum energy consumption for maneuvering can be chosen. References 9, tables 4, figures 3.

**Key words:** control of propulsion motors during electric ships' maneuvers, optimization method, optimal control laws.