

В.А. Яровенко, П.С. Черников, Е.И. Зарицкая, А.Н. Шумило

УПРАВЛЕНИЕ ГРЕБНЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРОХОДОВ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ

Метою роботи є пошук оптимального управління гребними електродвигунами (ГЕД) електроходів при русі по криволінійній траєкторії. В якості критеріїв оптимальності обрані показники, що характеризують судно. Методика. Оптимальні закони управління ГЕД, щоб забезпечити найкращі маневрені характеристики електроходів, можуть бути знайдені при спільному розгляді гребної електроенергетичної установки, гребних гвинтів і корпусу судна. Результати. Розроблено метод розрахунку перехідних режимів пропульсивних комплексів електроходів при маневруванні на криволінійній траєкторії. Запропоновано новий спосіб формування законів управління ГЕД. Виявлено характер цільових функцій і розроблений метод оптимізації параметрів сигналів управління. Проведено оптимізаційні розрахунки і знайдено оптимальне управління гребними електродвигунами електроходів при русі по криволінійній траєкторії. Оптимізація проведена за критерієм мінімуму витрат енергії і за критерієм мінімуму вибігу судна. Проілюстрована ефективність оптимізації. Наукова новизна. Метод пошуку оптимальних законів управління побудований за системним принципом, що дозволяє оптимізувати управління гребними електродвигунами за кінцевим результатом. Практична значимість. Запропоновані рекомендації можуть використовуватися і при проектуванні гребних електроенергетичних установок і при їх експлуатації. Бібл. 10, табл. 3, рис. 6.

Ключові слова: гребні електродвигуни електроходів, управління на маневрах, оптимальне управління при криволінійному русі, метод оптимізації.

Целью работы является поиск оптимального управления гребными электродвигателями (ГЭД) электроходов при движении по криволинейной траектории. В качестве критериев оптимальности выбраны показатели, характеризующие судно. Методика. Оптимальные законы управления ГЭД, обеспечивающие наилучшие маневренные характеристики электроходов, могут быть найдены при совместном рассмотрении гребной электроэнергетической установки, гребных винтов и корпуса судна. Результаты. Разработан метод расчета переходных режимов пропульсивных комплексов электроходов при маневрировании на криволинейной траектории. Предложен новый способ формирования законов управления ГЭД. Выявлен характер целевых функций и разработан метод оптимизации параметров сигналов управления. Проведены оптимизационные расчеты и найдено оптимальное управление гребными электродвигателями электроходов при движении по криволинейной траектории. Оптимизация проведена по критерию минимума расхода энергии и по критерию минимума выбега судна. Проиллюстрирована эффективность оптимизации. Научная новизна. Метод поиска оптимальных законов управления построен по системному принципу, что позволяет оптимизировать управление гребными электродвигателями по конечному результату. Практическая значимость. Предложенные рекомендации могут использоваться и при проектировании гребных электроэнергетических установок и при их эксплуатации. Библ. 10, табл. 3, рис. 6.

Ключевые слова: гребные электродвигатели электроходов, управление на маневрах, оптимальное управление при криволинейном движении, метод оптимизации.

Введение. Наличие у электроходов, кроме рулевой машины, нескольких мощных, динамичных и устойчивых к перегрузкам гребных электродвигателей (ГЭД) позволяет добиться высоких маневренных качеств у этих судов. При совместном маневрировании рулем и винтами улучшается поворотливость судна, повышается степень безопасности выполнения маневренных операций [1]. В то же время, при этом существенно изменяются нагрузки на гребные электродвигатели и на всю гребную электроэнергетическую установку в целом.

Криволинейность траектории движения судна, его рыскание, изменение условий взаимодействия гребных винтов, руля и корпуса судна существенно влияет на силы и моменты сил, действующие на корпус судна при его криволинейном неустановившемся движении [2, 3]. Еще большим изменением подвержены силы и моменты развиваемые винтами – полезный упор и момент сопротивления воды вращению гребного винта и соответственно – момент сопротивления гребному электродвигателю. Их значения изменяются в результате изменяющегося угла скоса потока воды и изменения скорости движения судна. Значения упора, момента сопротивления и поперечной силы внутреннего и внешнего гребных винтов

(по отношению к центру циркуляции) значительно отличаются между собой [4].

На рис. 1 построены планы скоростей двух винтов при криволинейном движении судна, где: v – линейная скорость движения центра тяжести судна; β – угол дрейфа; α_{BevL} и α_{BevR} – углы скоса потока воды, набегающей соответственно на левый и правый винт; u_L и u_R – поперечные составляющие скорости движения левого и правого винтов; v_L и v_R – скорости движения левого и правого винтов.

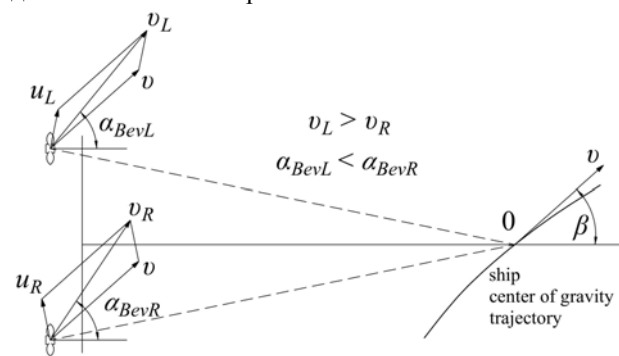


Рис. 1. План скоростей винтов при криволинейном движении

© В.А. Яровенко, П.С. Черников, Е.И. Зарицкая, А.Н. Шумило

Из рис. 1 видно, что внутренний винт работает в потоке с большим углом скоса, а внешний – с меньшим. Это влияет на динамические характеристики винтов, на момент сопротивления внешнему и внутреннему ГЭД. Нагрузки на них оказываются разными, что может привести к срабатыванию систем защиты более нагруженного гребного электродвигателя и, в конечном итоге, к невыполнению маневра.

Все это необходимо учитывать при формировании управляющих сигналов на гребные электродвигатели. Они должны быть такими, чтобы обеспечить, с одной стороны, наилучшую управляемость электрохода, а с другой – работу всех составных частей гребной электроэнергетической установки (ГЭЭУ) в допустимых режимах.

Состояние исследуемого вопроса. Управление частотно-регулируемыми гребными электродвигателями ГЭЭУ электрохода осуществляется формированием двух сигналов [5-7]:

– относительной частоты питающего напряжения

$$\alpha = \frac{f}{f_N}; \quad (1)$$

– относительной величины напряжения питания

$$\gamma = \frac{U}{U_N}. \quad (2)$$

Соотношение между относительным напряжением γ и относительной частотой α называют законом частотного управления. В работах [8, 9] показано, что для частотно-регулируемых гребных электродвигателей классический (пропорциональный) закон управления не эффективен, поскольку он получен применительно к показателям качества работы именно электродвигателей. В гребных электроэнергетических установках для управления гребными электродвигателями на маневрах необходимо иметь такие законы,

которые обеспечат наилучшие маневренные свойства электроходов. Показатели же работы ГЭЭУ, при этом, не должны выходить за допустимые пределы.

В [8] описан подход к решению задач поиска оптимальных законов управления гребными электродвигателями. Предложен способ формирования управляющих сигналов, в основе которого заложен системный принцип. Разработана процедура оптимизационных расчетов. Найдены оптимальные параметры законов управления при маневрировании на прямом курсе. Эффективность перехода к рекомендуемому закону управления проиллюстрирована сравнительным анализом результатов выполнения маневренных операций при управлении по классическим законам и по найденным оптимальным соотношениям между γ и α .

Изменение характера маневра, одновременное управление и гребными электродвигателями и рулем, необходимость учета и показателей маневренности электрохода и показателей качества работы гребной электроэнергетической установки, несомненно, повлияют на законы частотного управления.

Целью данного исследования является поиск оптимальных законов управления гребными электродвигателями электроходов, движущихся по криволинейной траектории, при совместном маневрировании ГЭД и рулем.

Метод решения задачи. Для достижения цели необходимо разработать математическую модель переходных режимов работы пропульсивного комплекса электрохода при движении по криволинейной траектории, сформировать целевую функцию и найти оптимальные законы управления ГЭД на маневрах.

Укрупненная структурная схема одного силового контура пропульсивного комплекса электрохода без учета взаимных связей представлена на рис. 2.

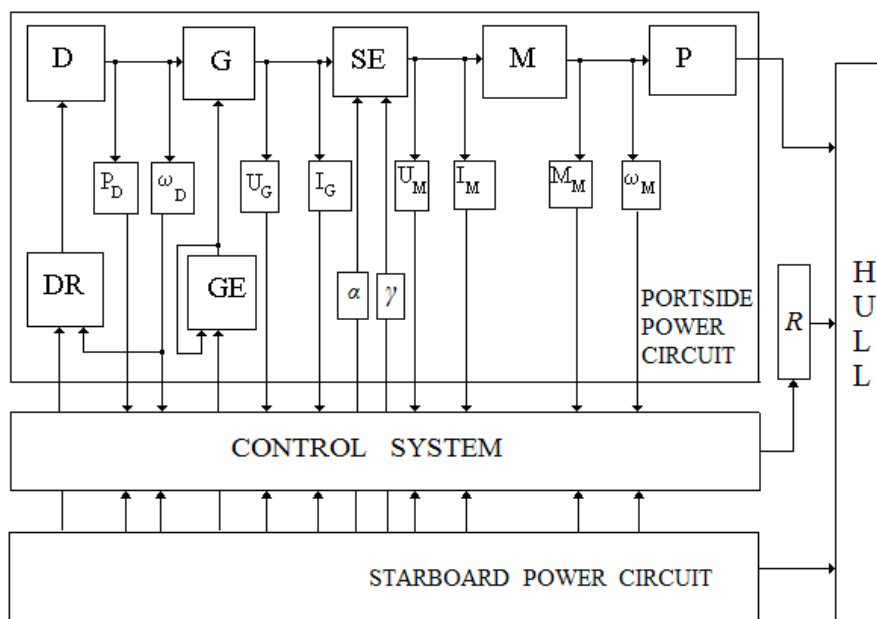


Рис. 2. Структурная схема одного силового контура пропульсивного комплекса электрохода

В состав каждого ее «силового» контура входят: тепловой двигатель – D , синхронный генератор – G , частотный преобразователь электроэнергии – SE ,

асинхронный гребной электродвигатель – M , регулятор частоты вращения теплового двигателя – DR , регулятор напряжения синхронного генератора – GE ,

гребной винт – P . В состав пропульсивного комплекса входят также руль – R и корпус судна. Основные параметры комплекса, управляющие сигналы и сигналы обратных связей: ω_D и P_D – угловая скорость вращения и мощность тепловых двигателей; U_G и I_G – напряжение и ток на выходе генераторов; U_M и I_M – напряжение и ток гребных электродвигателей; M_M и ω_M – вращающий момент и угловая скорость вращения ГЭД (и гребных винтов).

На базе структурной схемы разработана математическая модель и программы расчета переходных режимов работы пропульсивного комплекса на маневрах [10]. Найдены обобщенные безразмерные параметры комплекса. Изменения значений этих пара-

метров определяют поведение электроходов и влияют на численные значения показателей качества маневрирования.

В качестве примера, на рис. 3, приведены результаты расчетов текущих значений основных режимных показателей составных частей пропульсивного комплекса при выполнении электроходом маневра «разгон гребной электроэнергетической установки – выход судна на криволинейную траекторию (на циркуляцию)».

Результаты даны в относительном времени

$$T = v_0 t / L, \quad (3)$$

где: v_0 – скорость движения судна в установившемся (базовом) режиме; L – длина судна; t – текущее время.

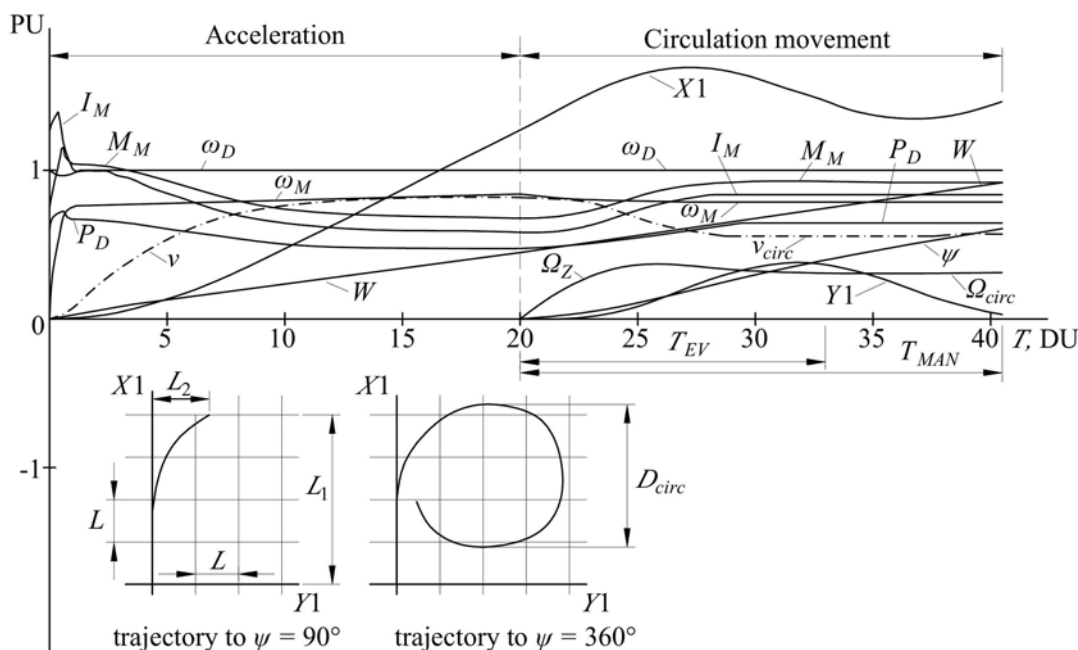


Рис. 3. Текущие значения основных режимных показателей при выполнении маневра «разгон ГЭЭУ – выход судна на циркуляцию»

На рис. 3 показаны относительные значения режимных показателей внутреннего, наиболее нагруженного, силового контура: теплового двигателя (ω_D , P_D); гребного электродвигателя (I_M , M_M , ω_M). Приведены также текущие значения: расхода энергии (W); скорости движения судна (v) и его курса (ψ); пройденного электроходом пути ($X1$ и $Y1$) в независимой от судна системе координат, и угловой скорости (Ω_Z) его вращения (поворота) вокруг вертикальной оси, проходящей через центр тяжести судна.

В исходном состоянии судно неподвижно, генераторные агрегаты работают на холостом ходу. Разгон начинается с увеличением относительных значений α и γ питающего электродвигатели напряжения. ГЭД начинают разгоняться. Вращающий момент M_M увеличивается, соответственно увеличиваются скорости вращения двигателей и гребных винтов ω_M . Упор винтов возрастает, и электроход начинает разгон (его скорость v увеличивается). С увеличением частоты вращения двигателя ω_M и скорости движения v судна, растет момент сопротивления гребного винта M_p . По мере роста питающего напряжения, увеличиваются ток I_M и вращающийся момент M_M электродвигателя.

Нагрузка на тепловой двигатель возрастает. Его мощность P_D повышается, а частота вращения ω_D , соответственно, несколько снижается. Расход энергии W растет. Увеличивается пройденный судном путь. Постепенно, через 12-13 относительных единиц времени (в описанном маневре), переходный процесс заканчивается, и пропульсивный комплекс выходит на режим работы, близкий к установившемуся. Расстояние, пройденное электроходом при выполнении маневра, описывается кривой $X1$.

С момента $T = 20$ относительных единиц времени начинается процесс выхода судна на криволинейную траекторию. Нагрузки на гребные электродвигатели и на тепловые двигатели генераторных агрегатов возрастают (I_M , M_M , P_D увеличиваются, ω_M падает). Электроход выходит на циркуляцию. Появляется угловая скорости Ω_Z и поперечное смещение $Y1$. Скорость судна v снижается. Приблизительно в $T = 33$ относительных единиц времени заканчивается эволюционный период циркуляционного движения и начинается его квазиустановившийся период. Электроход выходит на установившиеся значения скорости движения v_{circ} и угловой скорости вращения (циркуляции)

Ω_{circ} . Маневр заканчивается при достижении судном курса $\psi = 360^\circ$ (полная циркуляция). Общая продолжительность рассмотренного маневра $T = 40.5$ относительных единиц времени. Траектория движения центра тяжести электрохода показана на рис. 3.

Изменение текущих значений режимных показателей наглядно демонстрирует характер протекания переходных процессов. Однако, для оценки маневренных характеристик комплекса нужны отдельные показатели качества выполнения маневренных операций, позволяющие оценить поведение как составных частей гребной электроэнергетической установки, так и электрохода в целом. Это: колебания частоты вращения и колебания мощности тепловых двигателей; максимальные значения токов и моментов синхронных генераторов и гребных электродвигателей на переходных режимах; показатели, характеризующие стабильность параметров электроэнергии судовой электрической сети; инерционные характеристики судна; расход энергии (расход топлива) для выполнения маневров. Математическая модель и метод расчета [10] позволяют это сделать.

У электроходов управление каждым силовым контуром гребной электроэнергетической установки (управление каждым ГЭД) осуществляется независимо от других. На каждый гребной электродвигатель подаются (перекладкой рукояток ПУ) сигналы управления – по частоте вращения ГЭД (определяется относительной частотой тока α) и по напряжению (определяется величиной γ). Управление электроходом, при выходе на криволинейную траекторию, осуществляется перекладкой пера руля на правый борт, с одновременным подтормаживанием правого гребного электродвигателя. При таком маневрировании существенно изменяются углы скоса потока воды набегавшей на внешний и внутренний (относительно центра циркуляции) гребные винты (рис. 1). Изменяются их гидродинамические характеристики. Моменты сопротивления на валу гребных электродвигателей внешнего и внутреннего контура отличаются.

При подобном маневрировании относительная частота тока α_L для левого ГЭД постоянна на протяжении всего маневра. Для правого ГЭД частота α_R снижается с началом маневрирования (в соответствии новым положением рукоятки поста управления) и остается неизменной до конца маневра. Разность между α_L и α_R будем называть степенью подтормаживания гребного электродвигателя (гребного винта).

Как отмечалось выше, классический закон частотного управления не позволяет добиться высоких маневренных свойств электроходов. При системном подходе к оптимальному управлению ГЭД возникает необходимость в поисках таких сигналов управления, которые обеспечат наилучшие значения показателей качества маневрирования электроходов. При этом необходимо обязательно контролировать показатели работы всех составных частей гребной электроэнергетической установки, и в первую очередь – гребных электродвигателей и приводных двигателей генераторных агрегатов.

В работе [8] предложено формировать управляющие сигналы в виде:

$$\alpha = \alpha_{prim} + k_1(1 - \exp(-k_5 T)), \quad (4)$$

$$\gamma = k_2 \alpha + k_3 \alpha^2 + k_4 \alpha^3 + (1 - k_2 - k_3 - k_4) \alpha^4, \quad (5)$$

где: α_{prim} – начальное значение относительной частоты питающего ГЭД напряжения; k_2, k_3, k_4 – параметры сигналов управления, которые оптимизируются.

Для рассматриваемого маневра оптимизировать зависимость $\alpha = \alpha(T)$ не имеет смысла, поскольку α фиксировано и определяется заданной (рукояткой ПУ) частотой вращения ГЭД. Оптимизация будет касаться только поиска оптимальных параметров закона управления γ / α .

Согласно поставленной цели, в качестве критериев оптимальности принимаются или минимум затрат энергии на выполнение маневра – W_{Cmin} , или минимум выбега электрохода – L_{1min} . Первый критерий характеризует экономические показатели маневрирования, второй – безопасность выполнения маневренных операций.

В соответствии с поставленной задачей, необходимо минимизировать целевую функцию

$$W(\mathbf{k}) \rightarrow \min, \mathbf{k} \in \mathbf{k}^n, \quad (6)$$

либо

$$L_1(\mathbf{k}) \rightarrow \min, \mathbf{k} \in \mathbf{k}^n, \quad (7)$$

где $\mathbf{k} = [k_2, k_3, k_4]$ – оптимизируемые параметры; \mathbf{k}^n – допустимая область n – мерного пространства. Линейные ограничения p в виде неравенств $g_j(\mathbf{k}) \geq 0$, $j = 1, 2, \dots, p$, определяются допусками по диапазонам изменений режимных показателей ГЭЕУ и другими условиями выполнения маневров.

В работе [8] описан метод поиска оптимальных решений таких задач. Он разработан исходя из особенностей рассматриваемого объекта и выявленной в ходе исследований сложной топографии целевых функций. В процессе оптимизации осуществляются расчеты текущих значений всех режимных показателей комплекса по ходу выполнения электроходом соответствующих маневров и по их результатам определяются затраты энергии на выполнения маневра и выбег электрохода.

Результаты работы. Ниже представлены результаты оптимизации параметров закона частотного управления. Поиски оптимальных параметров проведены для одного из типовых (описанных выше) маневров электроходов – разгон и выход на циркуляционное движение. Оптимизация проведена по критерию W_{Cmin} и L_{1min} .

При формировании управляющих сигналов на гребные электродвигатели необходимо, как было отмечено выше, обеспечить работу гребной электроэнергетической установки в допустимых режимах. Из рис. 1 видно, что внутренний гребной винт работает в потоке с большим углом скоса. Нагрузка на его гребной электродвигатель оказывается существенно большей, чем нагрузка на внешний ГЭД. Возможное срабатывание систем защиты именно «внутреннего» силового контура может привести к невыполнению маневра или даже к аварийной ситуации. Исходя из этого, при поиске оптимальных параметров сигналов управления в первую очередь необходимо контролировать показатели работы внутреннего силового контура.

На характер выполнения электроходами маневренных операций, и соответственно на расход топлива и на выбег электрохода, оказывают влияние и конструктивные параметры судна, и параметры электроэнергетической установки и внешние условия. Степень влияния каждого параметра разная. При поисках оптимального управления гребными электродвигателями очень важно охватить как можно больше электроходов. Иными словами, полученные рекомендации должны быть справедливы для широкого класса судов.

В процессе разработки математической модели переходных режимов (в относительных единицах) были выявлены критерии динамического подобия (обобщенные безразмерные параметры пропульсивных комплексов); найдены диапазоны изменения их значений, охватывающие все электроходы с частотно-управляемыми ГЭД (при традиционном приводе гребных винтов).

Как показали предварительные исследования (отсеивающие эксперименты), наиболее существенное влияние на выбранные критерии, при совместном маневрировании рулем и гребными электродвигателями, оказывают следующие параметры: степень подтормаживания; v_{prim} – начальная скорость движения судна; β_R – угол перекладки пера руля; обобщенный безразмерный параметр комплекса N_X – энерговооруженность электрохода

$$N_X = \frac{L \sum K_{Pj} P_{ej0}}{(m + \lambda_{11}) v_0^2}, \quad (8)$$

где P_{ej0} и K_{Pj} – полезный упор гребного винта в установившемся режиме и его доля в суммарном упоре соответственно; m и λ_{11} – масса судна и присоединенные к нему массы воды (вдоль продольной оси X).

Для различных соотношений между этими параметрами (по сути дела – для различных электроходов) были проведены оптимизационные расчеты и получены оптимальные решения. В качестве примера, в табл. 1 (по критерию минимума затрат энергии W_{Cmin}) и в табл. 2 (по критерию минимума выбега судна L_{1min}) приведены некоторые их результаты. Это – оптимальные параметры закона частотного управления γ / α , представленного в виде уравнения (5), при выходе судна на циркуляцию с одновременным поворотом пера руля β_R и подтормаживанием правого гребного электродвигателя. Расчеты проведены для маневров при относительной начальной скорости судна $v_{prim}=1,0$ и $v_{prim} = 0,8$. В табл. 1 приведено небольшое количество вариантов сочетаний α_L , α_R , N_X , β_R и оптимальные решения для выполнения маневра по критерию минимума W_{Cmin} .

Таблица 1

Сочетания значимых параметров и оптимальные решения по критерию минимума затрат энергии W_{Cmin}

Вариант	Численные значения параметров, о.е.					$W_{Cclassic}$ о.е.	Оптимальные решения				Эффективность, %
	v_{prim}	α_L	α_R	N_X	β_R		уравнение $\gamma = \gamma(\alpha)$			W_{Cmin} о.е.	
							k_2	k_3	k_4		
1	1,0	1,0	0,8	0,12	0,262	16,67	2,08	-1,15	2,38	15,37	7,8
2	0,8	0,8	0,65	0,12	0,262	15,09	2,97	-2,39	1,71	10,86	28,03
3	0,8	0,8	0,55	0,12	0,262	13,16	3,24	-2,62	1,16	9,352	28,94
...
14	0,8	0,8	0,65	0,165	0,4	11,0	3,47	-3,089	1,342	7,93	27,91
15	0,8	0,8	0,55	0,165	0,4	9,7	3,27	-2,67	1,21	6,88	29,07
...
25	1,0	1,0	0,8	0,21	0,576	9,95	2,73	-0,07	-2,66	9,13	8,2
26	0,8	0,8	0,65	0,21	0,576	9,09	2,56	0,08	-2,27	6,93	27,51
27	0,8	0,8	0,55	0,21	0,576	8,02	3,2	-2,57	1,26	5,71	28,8

На рис. 4, в качестве иллюстрации, приведены графические интерпретации управляющего сигнала (5) с оптимальными значениями коэффициентов k_2 , k_3 , k_4 для первых трех вариантов (из табл. 1) сочетаний параметров α_L , α_R , N_X , β_R .

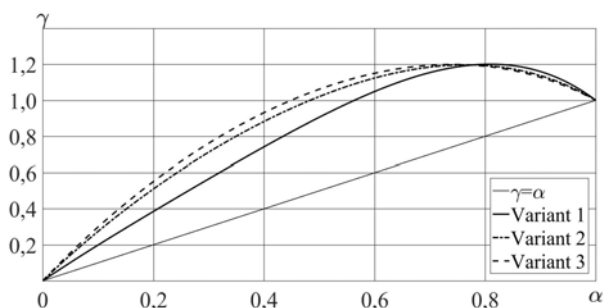


Рис. 4. Зависимости $\gamma = \gamma(\alpha)$ по критерию минимума затрат энергии W_{Cmin}

Для оценки эффективности оптимизации были рассчитаны соответствующие маневры при управлении гребными электродвигателями и по классическому пропорциональному закону. Результаты расчетов затрат энергии на выполнение маневров по этому закону приведены в столбце $W_{Cclassic}$ табл. 1. В последнем столбце таблицы проиллюстрирована эффективность оптимизации – степень снижения затрат энергии при переходе на оптимальное управление. В зависимости от условий маневрирования она колеблется от 8 % до 29 %.

Меньшая степень эффективности соответствует движению судна с большей скоростью, а большая эффективность – при движении с меньшей скоростью и максимальным подтормаживанием гребным электродвигателем (следует иметь в виду, что степень подтормаживания ограничена гидродинамической характеристикой гребного винта). Таким образом, переход

к оптимальному управлению ГЭД (а совместное маневрирование двигателями и рулем чаще всего осуществляется именно на частичном ходу судна) существенно снижает затраты энергии W_C , на выполнение маневра, что подтверждает его целесообразность.

Смена критерия оптимальности приводит, как и ожидалось, к другим оптимальным решениям. В табл. 2 представлены результаты оптимизационных расчетов по критерию минимума выбега электрохода

L_{1min} при выходе его на циркуляцию. Как видно из таблицы, численные значения коэффициентов k_2 , k_3 и k_4 существенно отличаются от тех, которые получены по критерию минимума расхода энергии.

На рис. 5 приведены графические интерпретации управляющих сигналов с оптимальными значениями коэффициентов k_2 , k_3 , k_4 для тех же первых трех (как и в табл. 1) вариантов сочетаний параметров α_L , α_R , N_X , β_R .

Таблица 2

Сочетания значимых параметров и оптимальные решения по критерию минимума выбега электрохода L_{1min}

Вариант	Численные значения параметров, о.е.					$L_{1classic}$ о.е.	Оптимальные решения				Эффективность, %
	v_{prim}	α_L	α_R	N_X	β_R		уравнение $\gamma = \gamma(\alpha)$			L_{1min} , о.е.	
							k_2	k_3	k_4		
1	1,0	1,0	0,8	0,12	0,262	7,03	3,32	-7,58	2,33	6,62	5,8
2	0,8	0,8	0,65	0,12	0,262	6,28	3,54	-7,96	3,55	5,62	10,5
3	0,8	0,8	0,55	0,12	0,262	5,8	3,8	-8,6	2,1	5,36	7,6
...
17	0,8	0,8	0,65	0,21	0,4	4,9	3,51	-7,9	2,2	4,56	6,9
...
25	1,0	1,0	0,8	0,21	0,576	4,15	3,57	-8,23	2,27	3,94	4,6
26	0,8	0,8	0,65	0,21	0,576	4,137	3,72	-8,57	2,05	3,85	9,7
27	0,8	0,8	0,55	0,21	0,576	4,06	3,87	-8,79	2,01	3,72	8,3

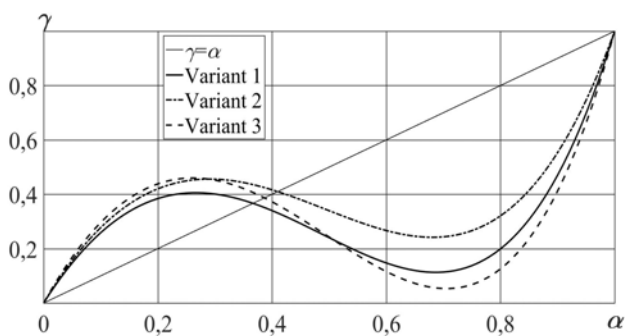


Рис. 5. Зависимости $\gamma = \gamma(\alpha)$ по критерию минимума выбега электрохода L_{1min}

Анализ этих зависимостей показывает следующее. Поскольку, одновременно с переключением пера руля производится подтормаживание правого гребного электродвигателя, нагрузки на этот ГЭД возрастают. Кроме того, гребной винт внутреннего ГЭД начинает работать в потоке воды с большим углом скоса (рис. 1), что приводит к увеличению его момента сопротивления.

На режимных показателях генераторных агрегатов это не сказывается, поскольку они охвачены перекрестными связями, а на показателях гребных электродвигателей это отражается, поскольку их силовые контуры независимы друг от друга. Внутренние ГЭД нагружены больше и их режимные показатели могут приблизиться к уставкам срабатывания систем защиты.

Для недопущения аварийного отключения ГЭД (а подобные маневры осуществляются, как правило, с целью предотвращения столкновения судов) необходимо снижать величину напряжения, что и должна сделать система автоматического регулирования в соответствии с рассчитанными оптимальными законами. Это видно на рис. 5.

Для оценки эффективности оптимизации (как и для варианта $W_{Classic}$ в табл.1) в табл. 2 приведены результаты расчетов выбега электрохода при управлении гребными электродвигателями и по классическому пропорциональному закону. Результаты расчетов по этому закону приведены в столбце $L_{1classic}$. Эффективность оптимизации – степень снижения выбега электрохода – колеблется в зависимости от условий маневрирования от 5 % до 11 %. Как и в предыдущем случае, большая степень эффективности получается при движении судна на промежуточных скоростях.

Для иллюстрации поведения пропульсивного комплекса после оптимизации законов управления, на рис. 6 представлены текущие значения основных режимных показателей при выполнении того же маневра, что и на рис. 3. Это вариант № 27 сочетания значимых параметров и условий выполнения маневра (табл. 2.) Выбранный вариант – пример средней эффективности.

Сравнительный анализ результатов расчета показывает, что с переходом к оптимальному управлению, выбег электрохода (критерий оптимальности) сократился с 4,06 до 3,72 длины судна, что составляет 8,3 %. Численные значения основных режимных показателей при управлении по пропорциональному и оптимальному законам также приведены в табл. 3.

Таким образом, переход к оптимальному управлению ГЭД позволяет существенно снизить выбег электрохода, что способствует повышению безопасности выполнения маневренных операций.

Обсуждение. Проведенные исследования наглядно показывают, что традиционное управление гребными электродвигателями не позволяет в полной мере реализовать у электроходов заложенные в них высокие маневренные свойства.

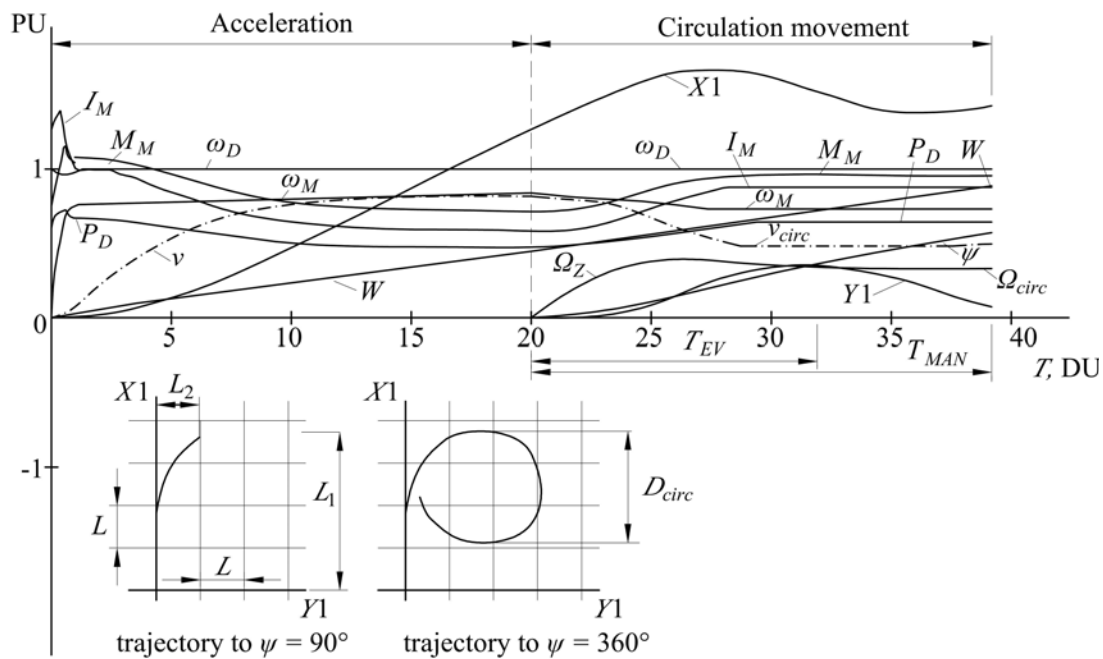


Рис. 6. Текущие значения основных режимных показателей маневра «разгон ГЭЭУ – выход судна на циркуляцию» при управлении по оптимальному закону

Таблица 3
Показатели качества маневрирования при разных законах управления

Показатель качества	Пропорциональный закон	Оптимальный закон	Отклонение показателя, %
T_{MAN}	20,5	19,2	+6,3
T_{EV}	13	11,9	+8,4
W	23,5	22	+6,8
L_1	$4,06L$	$3,72L$	+8,3
$L_2 (\psi=90^\circ)$	$1,32L$	$0,98L$	+25,8
D_{circ}	$3,22L$	$2,63L$	+18,3
I_M	0,83	0,88	-6
M_M	0,92	0,96	-4,3
ω_M	0,79	0,73	-7,6
v_{circ}	0,56	0,48	-14,3

Причиной является то, что классический пропорциональный закон управления, полученный применительно к «электрическим» показателям качества работы электродвигателей, не учитывает показатели работы судна. Но гребные электродвигатели предназначены именно для того, чтобы обеспечить наилучшие показатели качества работы именно судна, в частности – наилучшие его маневренные характеристики и высокие экономические показатели эксплуатации. Нужен системный подход к управлению ГЭД на маневрах. При этом «электрические» показатели должны отойти на второй план. Необходимо находить такое управление, которое обеспечит наилучшие показатели работы электрохода, с контролируемыми при этом показателями эксплуатации его гребной электроэнергетической установки.

Решение таких задач возможно только при комплексном подходе. Гребная электроэнергетическая установка должна рассматриваться совместно со всеми составными частями единого судового пропуль-

сивного комплекса, включающего в себя, кроме ГЭЭУ, и винты, и руль и корпус судна. Наличие математической модели, описывающей поведение пропульсивного комплекса на маневрах, метода расчета текущих значений основных режимных показателей, корректного (подходящего для решения подобных задач) метода оптимизации позволяет добиться поставленной цели.

Как показано в настоящей работе, при правильной организации управления гребными электродвигателями можно добиться наилучших значений показателей качества выполнения маневров и обеспечить, одновременно с этим, работу всех составных частей гребной электроэнергетической установки в допустимых режимах.

Выводы.

1. Обоснована целесообразность использования системного подхода при поиске оптимального управления гребными электродвигателями электроходов при маневрировании на криволинейной траектории. В качестве главных критериев оптимальности следует принимать показатели, характеризующие маневренные свойства судна. Показатели работы ГЭЭУ должны учитываться как ограничения.

2. Обоснованы недостатки «классического» варианта управления ГЭД. Предложен способ формирования сигналов управления ГЭД, с одновременной перекладкой пера руля, при выходе судна на циркуляцию. Разработана процедура оптимизации параметров сигналов управления.

3. Проведены оптимизационные расчеты и найдены оптимальные параметры сигналов управления гребными электродвигателями. Оптимизация проведена по критерию минимума затрат энергии на выполнение маневра и по критерию минимума выбега электрохода. Эффективность оптимизации находится в диапазоне от 5 % до 29 %.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Molland A. *The maritime engineering reference book. A guide to ship design, construction and operation*. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2008. 920 p. doi: [10.1016/b978-0-7506-8987-8.x0001-7](https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-8987-8.x0001-7).
2. Bertram V. *Practical Ship Hydrodynamics*. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2012. 390 p. doi: [10.1016/C2010-0-68326-X](https://doi.org/10.1016/C2010-0-68326-X).
3. Carlton J.S. *Marine propellers and propulsion. 4th edition*. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2018. 609 p. doi: [10.1016/C2014-0-01177-X](https://doi.org/10.1016/C2014-0-01177-X).
4. Небеснов В.И. *Динамика двигателя в системе корпус-винты-двигатели*. Ленинград: Судпромгиз, 1961. – 374 с.
5. Leonhard W. *Control of electrical drives*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001. 241 p. doi: [10.1007/978-3-642-56649-3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-56649-3).
6. Bose B.K. *Power electronics and AC drives*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New York, 2001. 738 p.
7. Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P. *Power electronics, converters, applications and design*. J. Wiley, New York, 2003. 811 p.
8. Яровенко В.А., Черников П.С., Варбанец Р.А., Зарицкая Е.И. Оптимальное управление гребными электродвигателями электроходов при реверсировании. *Електротехніка і електромеханіка*, 2018, № 6, С. 38-46. doi: [10.20998/2074-272X.2018.6.05](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.6.05).
9. Черников П.С., Яровенко В.А., Зарицкая Е.И. Вплив законів управління частотнорегульованими гребними електродвигунами на маневрені характеристики електроходів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії», 2020, № 3 (1357), С. 45-51. doi: [10.20998/2409-9295.2020.3.08](https://doi.org/10.20998/2409-9295.2020.3.08).
10. Яровенко В.А., Черников П.С. Метод расчета переходных режимов гребных электроэнергетических установок электроходов. *Електротехніка і електромеханіка*, 2017, № 6, С. 32-41. doi: [10.20998/2074-272X.2017.6.05](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.05).

REFERENCES

1. Molland A. *The maritime engineering reference book. A guide to ship design, construction and operation*. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2008. 920 p. doi: [10.1016/b978-0-7506-8987-8.x0001-7](https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-8987-8.x0001-7).
2. Bertram V. *Practical Ship Hydrodynamics*. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2012. 390 p. doi: [10.1016/C2010-0-68326-X](https://doi.org/10.1016/C2010-0-68326-X).
3. Carlton J.S. *Marine propellers and propulsion. 4th edition*. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2018. 609 p. doi: [10.1016/C2014-0-01177-X](https://doi.org/10.1016/C2014-0-01177-X).
4. Nebesnov V.I. *Dinamika dvigatelja v sisteme korpus sudnavinty-dvigateli* [Engine dynamics in the ship hull-propeller-engine system]. Leningrad, Sudpromgiz Publ., 1961. 374 p. (Rus).
5. Leonhard W. *Control of electrical drives*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001. 241 p. doi: [10.1007/978-3-642-56649-3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-56649-3).
6. Bose B.K. *Power electronics and AC drives*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New York, 2001. 738 p.
7. Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P. *Power electronics, converters, applications and design*. J. Wiley, New York, 2003. 811 p.

8. Yarovenko V.A., Chernikov P.S., Varbanets R.A., Zaritskaya E.I. Optimal control of the electric ships' propulsion motors during reversal. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no. 6, pp. 38-46. doi: [10.20998/2074-272X.2018.6.05](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.6.05).
9. Chernikov P.S., Yarovenko V.A., Zaritskaya E.I. The influence of control laws of frequency-regulated electric motors on electric ships' maneuvering characteristics. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: «Electric machines and electromechanical energy conversion»*, 2020, no. 3 (1357), pp. 45-51. (Ukr). doi: [10.20998/2409-9295.2020.3.08](https://doi.org/10.20998/2409-9295.2020.3.08).
10. 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](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.6.05).

Received 25.07.2020

Яровенко Владимир Алексеевич¹, д.т.н., проф.,
Черников Павел Сергеевич¹, к.т.н.,
Зарицкая Елена Игоревна¹, к.т.н., доц.,
Шумило Александр Николаевич¹, к.т.н., доц.,
¹Одесский национальный морской университет,
65007, Одесса, ул. Мечникова, 34,
e-mail: yarovenko@3g.ua, chernikov@onmu.odessa.ua,
zarickayalena@ukr.net, shumilo.alexander@gmail.com

V.A. Yarovenko¹, P.S. Chernikov¹, E.I. Zaritskaya¹,
A.N. Schumylo¹

¹Odessa National Maritime University,
34, Mechnikova Str., Odessa, 65007, Ukraine.

Control of electric ships' propulsion motors when moving on curvilinear trajectory.

Purpose. The aim of the work is to search for the optimal control of the electric ships' propeller motors (PM) while moving on curvilinear trajectory. The indices characterizing the vessel were selected as the criteria of optimality. **Methodology.** Optimal control laws of PM providing electric ships' best maneuverability can be found by joint consideration of the electric propelling plant (EPP), propellers and hull. **Results.** A method of calculating the transient regimes of the electric ships' propulsion complexes during maneuver has been developed. A new method of forming the PM control laws is proposed. The nature of the target functions is revealed and a method of optimizing the parameters of control signals is developed. Optimization calculations have been carried out and the optimal control of the electric ships' propeller motors when moving along curvilinear trajectory has been found. Optimization has been carried out by the criterion of minimum energy consumption and by the criterion of minimum ship's distance. The optimization efficiency is illustrated. **Scientific novelty.** The method of searching for the optimal control laws is constructed according to the system principle, which allows optimizing the control of the propulsion motors by the final result. **Practical value.** The proposed recommendations can be used in the design of electric propelling plants and in their operation. References 10, tables 3, figures 6.

Key words: electric ships' propulsion motors, control on maneuvers, optimal control during curvilinear motion, optimization method.