

MODELING OF THE SYSTEM OF ENERGY EFFICIENT CONTROL OF THE ELECTRICAL PROPULSION INSTALLATION WITH HOMOPOLAR MACHINES

A. Yu. Rumyantsev

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

When considering electrical propulsion installations, the prospects for their development are shown through the development of the energy and shipbuilding industries. Two directions of perspective development of rowing electric installations are allocated. This is the use of homopolar machines with superconducting windings as main generators and propulsion motors and ensuring high energy efficiency of sea-going vessels through the use of optimal control by the criterion of minimum losses. The advantage of propulsion systems made according to the generator-engine (G – E) scheme with homopolar machines with the use of optimal control is shown. An analytical expression for the energy loss is obtained when it is transferred from the primary thermal engine to the propulsion motor and propeller, depending on the state variables of the propulsion system. Graphical dependences of the power losses on the armature current of the machines are presented for various values of the generator armature rotation speed and for various engine armature rotation speeds. A dynamic model of the diesel-electric propulsion system with homopolar machines is generated. The synthesis of optimal variable state controllers for controlling the speed of rotation of the motor armature has been made. For this purpose, the control actions on the propulsion diesel-electric installation, which are optimal for the energy loss criterion, are determined for a fixed value of the engine's rotation speed. A block diagram of the optimal control system for a rowing diesel-electric installation has been constructed for setting the screw speed. Modeling of dynamic processes is carried out, transitional characteristics of state variables of the system are obtained, graphs of the behavior of losses in transient regimes are presented. The effectiveness of the application of optimal control systems in rowing electrical installations using homopolar machines is shown.

Keywords: electric propulsion installation with homopolar machines, energy efficient control, power loss, optimal regulator of the state of the propulsion system, criterion for minimizing energy losses, efficiency of constructing optimal control systems.

For citation:

Rumyantsev, Aleksey Yu. "Modeling of the system of energy efficient control of the electrical propulsion installation with homopolar machines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 828–840. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-828-840.

УДК 62-503.56

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРЕБНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ С УНИПОЛЯРНЫМИ МАШИНАМИ

А. Ю. Румянцев

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

При рассмотрении гребных электрических установок показана перспективность их развития благодаря развитию энергетической и судостроительной областей промышленности. Выделены два направления перспективного развития гребных электрических установок: использование в качестве главных генераторов и гребных электродвигателей униполярных машин со сверхпроводниковыми обмотками и обеспечение высокой энергетической эффективности морских судов за счет применения оптимального управления по критерию минимума потерь. Показано преимущество гребных установок, выпол-

ненных по схеме генератор – двигатель (Г – Д) с униполярными машинами с применением оптимального управления. Получено аналитическое выражение потерь энергии при передаче ее от первичного теплового двигателя к гребному электродвигателю и винту в зависимости от переменных состояния гребной электрической установки. Представлены графические зависимости потерь мощности от тока якорей машин при различных значениях скорости вращения якоря генератора и при различной скорости вращения якоря двигателя. Сформирована динамическая модель гребной дизель-электрической установки с униполярными машинами. Произведен синтез оптимальных регуляторов переменных состояния для управления скоростью вращения якоря двигателя. Для этого определены оптимальные по критерию потерь энергии управляющие воздействия на гребную дизель-электрическую установку при фиксированном значении скорости вращения якоря двигателя. Построена структурная схема системы оптимального управления гребной дизель-электрической установкой при задании скорости винта. Проведено моделирование динамических процессов, получены переходные характеристики переменных состояния системы, представлены графики поведения потерь в переходных режимах. Показана эффективность применения оптимальных систем управления в гребных электрических установках с применением униполярных машин.

Ключевые слова: гребная электрическая установка с униполярными машинами, энергоэффективное управление, зависимости потерь мощности, оптимальный регулятор переменных состояния гребной электрической установки, критерий минимизации потерь энергии, эффективность построения оптимальных систем управления.

Для цитирования:

Румянцев А. Ю. Моделирование системы энергоэффективного управления гребной электрической установкой с униполярными машинами / А. Ю. Румянцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 828–840. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-828-840.

Введение (Introduction)

В составе движительного комплекса судна в настоящее время получили широкое применение гребные электрические установки (ГЭУ). Такие установки обеспечивают выработку и передачу электроэнергии на движитель судна, включая в свой комплекс различные сочетания первичных тепловых двигателей, генераторов, электрических преобразователей, гребных электродвигателей, механических преобразователей, движителей, систем управления, регулирования, а также различных видов защит и блокировок. Стремительное развитие отраслей энергетической и судостроительной промышленной отрасли требует появления новых перспективных видов ГЭУ, которые должны отвечать требованиям высокой маневренности и энергоэффективности [1] – [4].

Одним из направлений развития ГЭУ является использование в качестве главных генераторов и гребных электродвигателей (ГЭД) униполярных машин, в том числе со сверхпроводниковыми обмотками, которые имеют хорошие массогабаритные характеристики и легко управляются [5] – [7]. В то же время задачей проектирования современной ГЭУ является обеспечение высокой энергетической эффективности судна [8] – [11]. Исходя из этого и учитывая то, что мощность современной ГЭУ достигает 95 % от мощности электростанции судна, необходимо учитывать распределение потерь энергии в энергетическом балансе при передаче и распределении мощности от первичного теплового двигателя (дизеля) к движителю (винту). В этом направлении развития большое преимущество получают гребные установки, выполненные по схеме Г – Д с униполярными машинами. Такие системы не имеют мощных электрических преобразователей в цепи главного тока — якоря электрических машин (рис. 1), что открывает неограниченные возможности для реализации ГЭУ большой мощности. При этом управление униполярными машинами осуществляется в цепи обмоток намагничивания. Кроме того, появляется возможность регулирования оборотов первичного теплового двигателя, что позволяет применить оптимальное управления по критерию минимума потерь путем воздействия одновременно не только на электрические машины, но и на тепловой двигатель. Все это в совокупности приводит к существенной результативности по снижению потерь энергии, снижению расхода топлива и повышению энергоэффективности судна в целом.

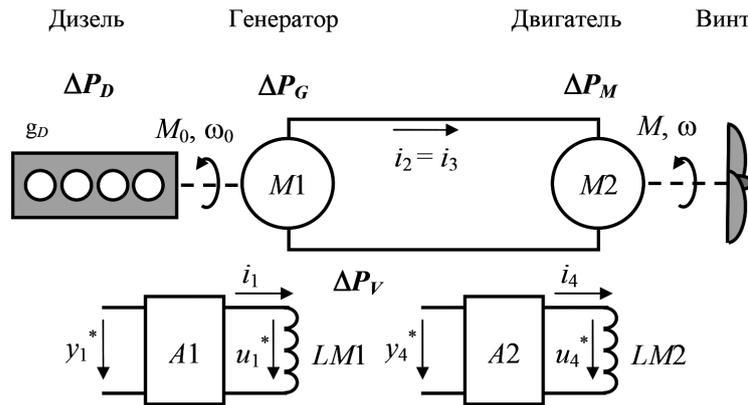


Рис. 1. Схема гребной дизель-электрической установки с униполярными машинами

Методы и материалы (Methods and Materials)

Электрическая технология передачи энергии от двигателя к движителю достаточно сложна. При формировании электромагнитного момента гребного электродвигателя M (см. рис. 1) в канале преобразования его от дизеля к винту возникают следующие потери мощности:

ΔP_D — потери в дизеле (тепловом двигателе);

ΔP_G — потери в генераторе;

ΔP_V — потери в преобразователе;

ΔP_M — потери в гребном электродвигателе.

Данные потери также являются функцией следующих переменных состояния ГЭУ:

M_0 — момента на валу дизеля;

ω_0 — скорости вращения дизеля и якоря (ротора) генератора;

i_1 — тока возбуждения генераторной установки;

i_2, i_3 — токов нагрузки генераторной установки и гребного электродвигателя соответственно;

i_4 — тока возбуждения гребного электродвигателя;

M — момента на валу гребного электродвигателя и винта;

ω — скорости вращения якоря (ротора) гребного электродвигателя и винта;

g_D — удельного расхода топлива на Ватт мощности (кг/Вт).

Целью энергоэффективного (оптимального по критерию потерь энергии) управления ГЭУ является максимально эффективная передача произведенной мощности от двигателя к движителю винту с минимальными потерями электроэнергии в целом. Это возможно, если рассматривать ГЭУ как единую систему с множеством переменных управления, каждая из которых настроена на свой оптимум, обеспечивая критерий оптимальности минимума потерь, но сохраняя значение выходной целевой функции, а именно: электромагнитного момента или скорости гребного двигателя. Эта величина определяется исходя из условий эксплуатации и задается оператором или системой управления более высокого уровня.

Передача энергии от дизеля к винту с целью создания электромагнитного момента решается неоднозначно. Одно и то же значение электромагнитного момента ГЭД может быть получено при различных сочетаниях переменных состояния ГЭУ [12], [13]. Решение данной задачи связано с определенными сложностями. Полученная оптимальная зависимость управления в большинстве случаев не имеет аналитического решения для нелинейных систем, решение даже для линейных систем может быть получено только численными методами [14] и только для квадратичного критерия качества. Формирование динамики по корням характеристического уравнения не дает желаемых динамических процессов. Корневые методы дают желаемые динамические процессы и, соответственно, субъективно лучшую динамику, но не решают задачи оптимального управления.

Предлагается решение задачи оптимального управления ГЭУ следующим образом. Рассмотрим ГЭУ как динамическую систему, которая описывается вектором дифференциальных уравнений:

$$pX = f(U, X_1, X_2), \quad (1)$$

где U — вектор управляющих воздействий; $X = X_1 \cup X_2$ — вектор переменных состояния; $X_1 \in X$ — вектор с размерностью вектора U , переменные состояния которого доступны для наблюдения; $X_2 \in X$ — дополнение вектора X_1 до вектора X .

Методами параллельной или / и последовательной коррекции для каждой подсистемы сформируем динамику с желаемыми динамическими процессами регуляторами W_p таким образом, чтобы статическая ошибка равнялась нулю:

$$\Delta X_1 = X_{1\text{опт}}^0 - K_{OC} \cdot X_1 = 0. \quad (2)$$

Выбор параметров регуляторов может быть выполнен с использованием корневых методов. Будем полагать, что переходная характеристика желаемого динамического процесса может быть аппроксимирована экспоненциальной функцией (рис. 2). При этом входные переменные $X_{1\text{опт}}^0$ будут задавать выходные переменные X_1 .

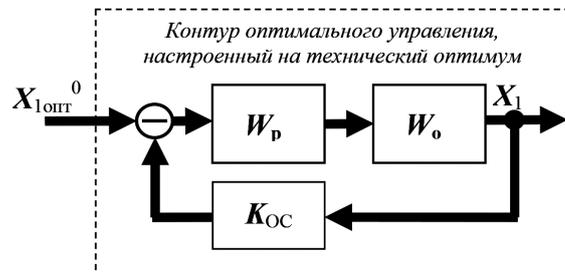


Рис. 2. Формирование желаемых переходных характеристик СЭЭС с СЭД методами последовательной коррекции:

W_o — передаточная функция объектов управления подсистем;
 W_p — передаточная функция регулятора; K_{OC} — вектор пропорциональной обратной связи

В результате формирования желаемого динамического поведения подсистем исходная система дифференциальных уравнений примет вид

$$pX = f_0(X_{1\text{опт}}^0, X_1, X_2), \quad (3)$$

где $X_{1\text{опт}}^0$ — вектор новых управляющих воздействий, задающих статические значения переменных состояния X_1 .

Для определения оптимальных управляющих воздействий $X_{1\text{опт}}^0$ должна быть сформирована функция оптимального управления. Под функцией оптимальности будем понимать потери энергии при ее передаче от двигателя к движителю:

$$\Delta P(X_{11}, X_{12}, X_2). \quad (4)$$

Положим, что задача управления ГЭУ состоит в формировании заданного значения целевой функции (скорость винта или момента на валу):

$$M = f_M(X_{11}), \quad (5)$$

которая является функцией переменных состояния $X_{11} \in X_1$ на пространстве переменных состояния которые доступны для наблюдения X_1 . Дополнение вектора X_{11} до вектора X_1 обозначим X_{12} : $X_{11} \cup X_{12} = X_1$.

Из выражения (5) можно найти один из элементов вектора X_{11} , например,

$$x_1 = M f_M^{-1}(X_{11}'), \quad (6)$$

где X'_{11} — вектор X_{11} без элемента x_1 ; f_M^{-1} — функция, обратная f_M .

Используя введенные обозначения, переформируем функцию оптимального управления (4) в следующий вид:

$$\Delta P(M f_M^{-1}(X'_{11}), X'_{11}, X_{12}, X_2) = DP_M(M, X'_1, X_2), \quad (7)$$

где ΔP_M — функция оптимального управления с учетом заданного значения целевой функции M ; X'_1 — вектор X_1 без элемента x_1 .

В стационарном режиме система уравнений (3) примет вид

$$0 = f_{\text{опт}}(X_{\text{опт}}^0, X_1, X_2).$$

Из данного уравнения с учетом отсутствия статической ошибки в управлении выразим вектор $X_2 = f_2(X_{\text{опт}}^0, X_1)$ и подставим в выражение функции оптимального управления (3). В результате получим функцию в следующем виде:

$$\Delta P_M(M, X'_1), f_2(X_1) = \Delta P_A(M, X'_1). \quad (8)$$

Найдем минимум функции потерь в пространстве, заданном вектором переменных состояния X'_1 . Для этого выполним дифференцирование по элементам вектора X'_1 . В результате получим вектор производных:

$$\Delta P_A = \frac{\partial \Delta P_A(M, X'_1)}{\partial X'_1}. \quad (9)$$

Положим, что существует вектор X'_1 , который обращает элементы вектора производных ΔP_A в ноль:

$$\Delta P_A = \frac{\partial \Delta P_A(M, X'_1)}{\partial X'_1} = 0. \quad (10)$$

Тогда в пространстве, заданном вектором X'_1 существует оптимальное состояние, минимизирующее функцию оптимального управления (8). В этом случае вектор управляющих воздействий $X_{\text{опт}}^{0'} = X'_1$ находится путем решения уравнения

$$\frac{\partial \Delta P_A(M, X_{\text{опт}}^{0'})}{\partial X_{\text{опт}}^{0'}} = 0, \quad (11)$$

где $X_{\text{опт}}^{0'}$ — вектор $X_{\text{опт}}^0$ без элемента x_1^0 (элемент x_1^0 может быть найден из выражения (6)).

Решение уравнения дает вектор оптимальных значений управляющих воздействий $X_{\text{опт}}^0 = f(M, X_1)$. Таким образом, в системе с оптимальным управлением формируется оптимальный регулятор:

$$W_{\text{опт}} = \frac{X_{\text{опт}}^0}{f(M, X_1)}. \quad (12)$$

В итоге система оптимального управления имеет вид рис. 3.

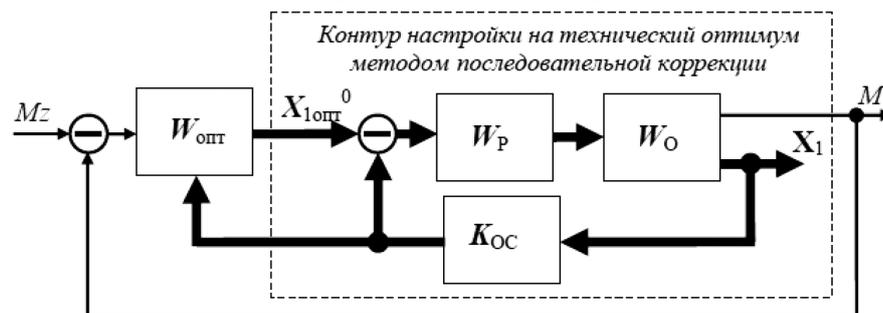


Рис. 3. Система оптимального управления динамической системой: $W_о$ — передаточная функция объекта управления; $W_{\text{опт}}$ — передаточная функция оптимального регулятора; $K_{\text{ос}}$ — вектор пропорциональной обратной связи; M_z — заданное значение целевой функции M ; $X_{\text{опт}}^0$ — вектор оптимальных управляющих воздействий

Данный метод построения оптимального управления в ГЭУ судна позволяет найти и сформировать управляющие воздействия каждой подсистемы, которые в целом минимизируют функцию оптимального управления и поддерживают заданное значение целевой функции. При этом переход от одного оптимального состояния системы к другому происходит по желаемым динамическим процессам, которые протекают с заданным перерегулированием и максимальным быстродействием. Способ применим также для формирования оптимального управления в кусочно-линейных динамических системах.

Результаты (Results)

В данном рассматриваемом случае при оптимальном управлении значения переменных состояния определяются так, чтобы минимизировать критерий управления, а именно суммарные потери в элементах, участвующих в передаче энергии от дизеля к винту: $\Delta P = \Delta PD + \Delta PG + \Delta PV + \Delta PM$. Минимум критерия находится в области переменных состояния системы управления ГЭУ в целом. При этом переменные состояния связаны между собой заданным электромагнитным моментом. При поиске экстремума используются связи между переменными состояниями, определенные уравнениями [15] – [17] и математическими моделями электропривода ГЭУ, описывающими динамику системы. Таким образом, функция потерь мощности ΔP имеет экстремумы на переменных состояниях.

Для ГЭУ с униполярными машинами (см. рис. 1) функция потерь мощности принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta P^* = & \omega^* \cdot L_{34}^* M^* / (L_{34}^* i_2^*) \cdot i_2^* \cdot (g_D^* \cdot \omega_0^* - 1) + (R_1^* \cdot ((L_{34}^* \cdot M^* / (L_{34}^* i_2^*) \cdot \omega^* - R_2^* i_2^*) / L_{12}^* \omega_0^*))^2 + \\ & + R_4^* \cdot (M^* / L_{34}^* i_2^*)^2 + R_2^* i_2^{*2} + n \Delta U^* \cdot ((L_{34}^* M^* / L_{34}^* i_2^*) \cdot \omega^* - R_2^* i_2^*) / (L_{12}^* \omega_0^*) + M^* / L_{34}^* i_2^* + \\ & + \Delta P_{\text{мех.ном}}^* \cdot \omega_2^* + \Delta P_{\text{мех.2ном}}^* \cdot \omega_0^{*2} \cdot g_D^* \cdot \omega_0^*. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь * — относительное значение величины; L_{34}^* , L_{12}^* — взаимная индуктивность обмоток якоря и возбуждения генератора и двигателя соответственно; $\Delta P_{\text{мех.ном}}^*$ — величина механических потерь номинального режима работы (в относительных единицах обычно не превосходит 0,015 ... 0,025).

Полученное выражение является функцией потерь мощности, имеющей экстремумы на переменных i_2^* и ω_0^* . Зависимости потери мощности от тока цепи якорей i_2^* при различных значениях скорости вращения якоря генератора ω_0^* и скорости вращения якоря гребного двигателя ω^* приведены на рис. 4.

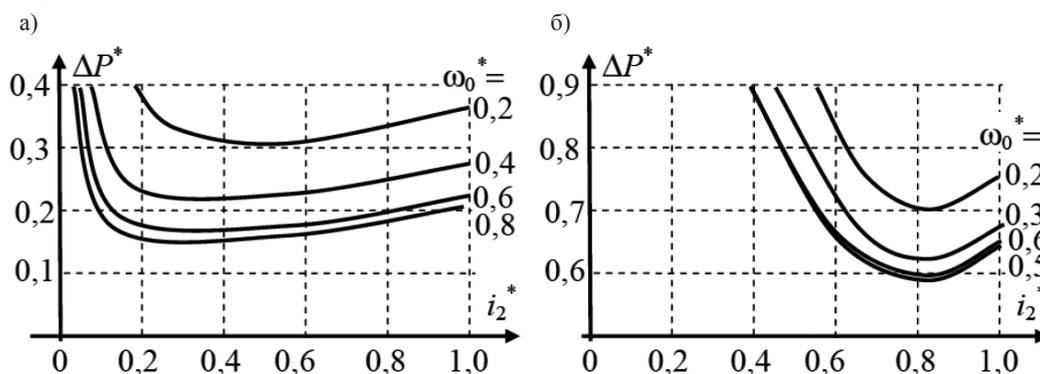


Рис. 4. Зависимости потерь мощности ΔP^* от тока якорей i_2^* :
 при различных значениях скорости вращения якоря генератора ω_0^*
 и якоря двигателя: а — $\omega^* = 0,5$; б — $\omega^* = 0,8$

Полученные из графиков результаты показывают, что во всех режимах имеется минимум функции потерь мощности, который соответствует оптимальному значению переменных

состояния ГЭУ. Решение уравнения дает вектор оптимальных значений управляющих воздействий ГЭУ и, таким образом, в системе с оптимальным управлением формируется оптимальный регулятор.

Для формирования системы оптимального управления ГЭУ необходимо сформировать динамическую модель. Динамическая модель гребной дизель-электрической установки с униполярными машинами формируется на базе динамических моделей ее элементов: дизеля, генератора-двигателя и винта [18], [19]. Структурная схема гребной дизель-электрической установки с униполярными машинами приведена на рис. 5.

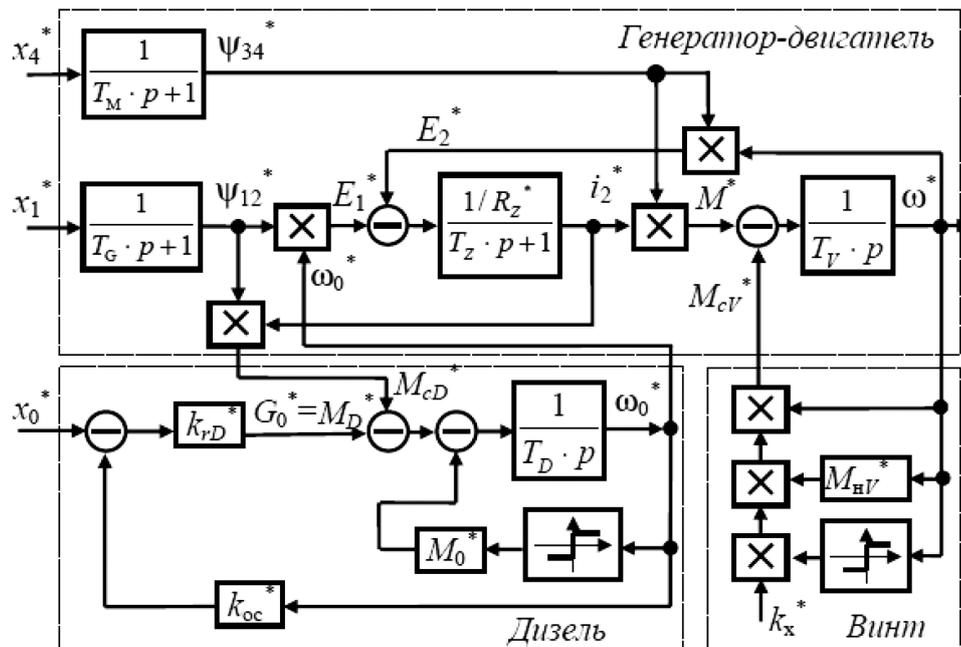


Рис. 5. Структурная схема системы дизель-генератор – двигатель-винт:
переменные x_0^* , x_1^* , x_4^* — управляющие внешним возмущающим воздействием kx^* ;
 M_{cd}^* , M_{hv}^* — моменты сопротивления дизеля и двигателя соответственно;
 ω^* — выходная (управляемая) переменная

Приведенная структурная схема позволяет моделировать динамическое поведение гребной дизель-электрической установки с униполярными электрическими машинами и синтезировать желаемые динамические процессы. Далее при моделировании производится синтез оптимальных регуляторов переменных состояния для управления скоростью вращения якоря двигателя и соответственно винта. Для этого определяются оптимальные по критерию потерь энергии управляющие воздействия на гребную дизель-электрическую установку при фиксированном значении скорости вращения якоря двигателя.

Рассмотрим синтез динамических процессов при управлении скоростью вращения винта путем воздействия на контур тока цепи якорей машин i_2^* . При этом остаются не заданными входные воздействия на контуры тока обмотки возбуждения двигателя i_4^* ($\Psi_{34}^* = L_{34}^* i_4^*$) и контур скорости вращения маховых масс дизель-генератора ω_0^* . При формировании оптимального управления ток обмотки возбуждения двигателя и скорость вращения маховых масс дизель-генератора вычисляются исходя из заданного значения скорости вращения винта. Так как ток цепи якорей машин задан управляющим воздействием x_1^* , следует сформировать оптимальные управляющие воздействия на контур тока возбуждения двигателя x_4^* и контур скорости вращения маховых масс дизеля x_0^* исходя из критерия оптимальности минимума потерь ΔP^* .

Минимум критерия достигается при выполнении равенства

$$i_{2\text{опт}}^* = \sqrt{M^*} \cdot \left(\frac{R_1^* \cdot \omega^{*2}}{R_2^* \cdot L_{12}^* \cdot \omega_0^{*2}} + \frac{R_4^*}{R_2^* \cdot L_{34}^*} \right)^{1/4} \quad (14)$$

Зная, что величина электромагнитного момента силы определяется выражением $M^* = L_{34}^* i_3^* i_4^*$, найдем ток i_4^* :

$$i_{4\text{опт}}^* = i_{2\text{опт}}^* \cdot \sqrt{\frac{R_2^* \cdot \omega_0^{*2} \cdot L_{12}^{*2}}{R_4^* \cdot L_{12}^{*2} \cdot \omega_0^{*2} + R_1^* \cdot L_{34}^{*2} \cdot \omega^{*2}}} \quad (15)$$

Значения ω^* и ω_0^* в данном выражении определяются с соответствующих датчиков, значение $i_{2\text{опт}}^*$ является задающим воздействием на контур тока якорей электрических машин.

Оптимальное управление контуром скорости вращения маховых масс дизель-генератора имеет следующий вид:

$$\omega_{0\text{опт}}^* \approx \Omega_0 \cdot \frac{\omega^2 (\omega + \Delta P_{\text{мех}2\text{ном}}^*) + [(6\Omega_0 - 3 - 2\Omega_0^2) + 3(1 - \Omega_0)^2 / (1 - g_0)] \cdot \Delta P_{\text{мех}1\text{ном}}^*}{\omega^2 (\omega + \Delta P_{\text{мех}2\text{ном}}^*) + [(8\Omega_0 - 4 - 3\Omega_0^2) + 4(1 - \Omega_0)^2 / (1 - g_0)] \cdot \Delta P_{\text{мех}1\text{ном}}^*} \quad (16)$$

При этом выполнено упрощение $R_1^* = R_2^* = R_4^* = 0$.

Структурная схема системы оптимального управления гребной дизель-электрической установкой с униполярными машинами при задании скорости винта приведена на рис. 6.

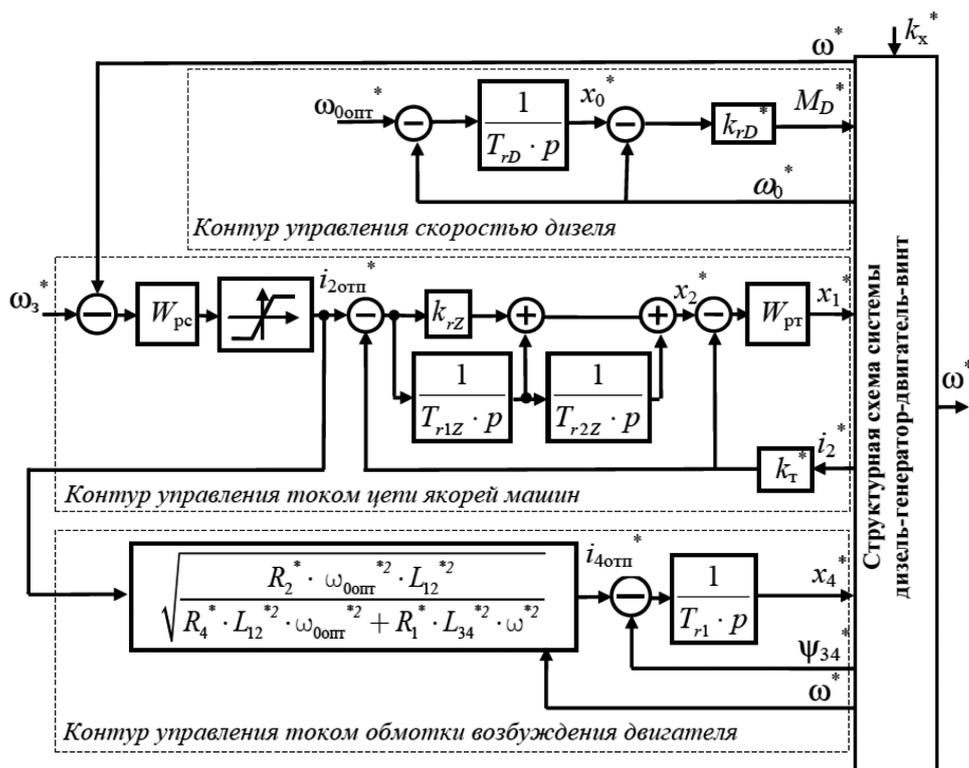


Рис. 6. Структурная схема системы оптимального управления гребной дизель-электрической установкой с униполярными машинами при задании скорости винта ω_3^*

На базе полученной системы управления была построена математическая модель с использованием технологии компьютерного моделирования динамических систем с использованием программы Simulink [20]. Получены переходные характеристики переменных состояния системы при различном значении задающего воздействия (рис. 7).

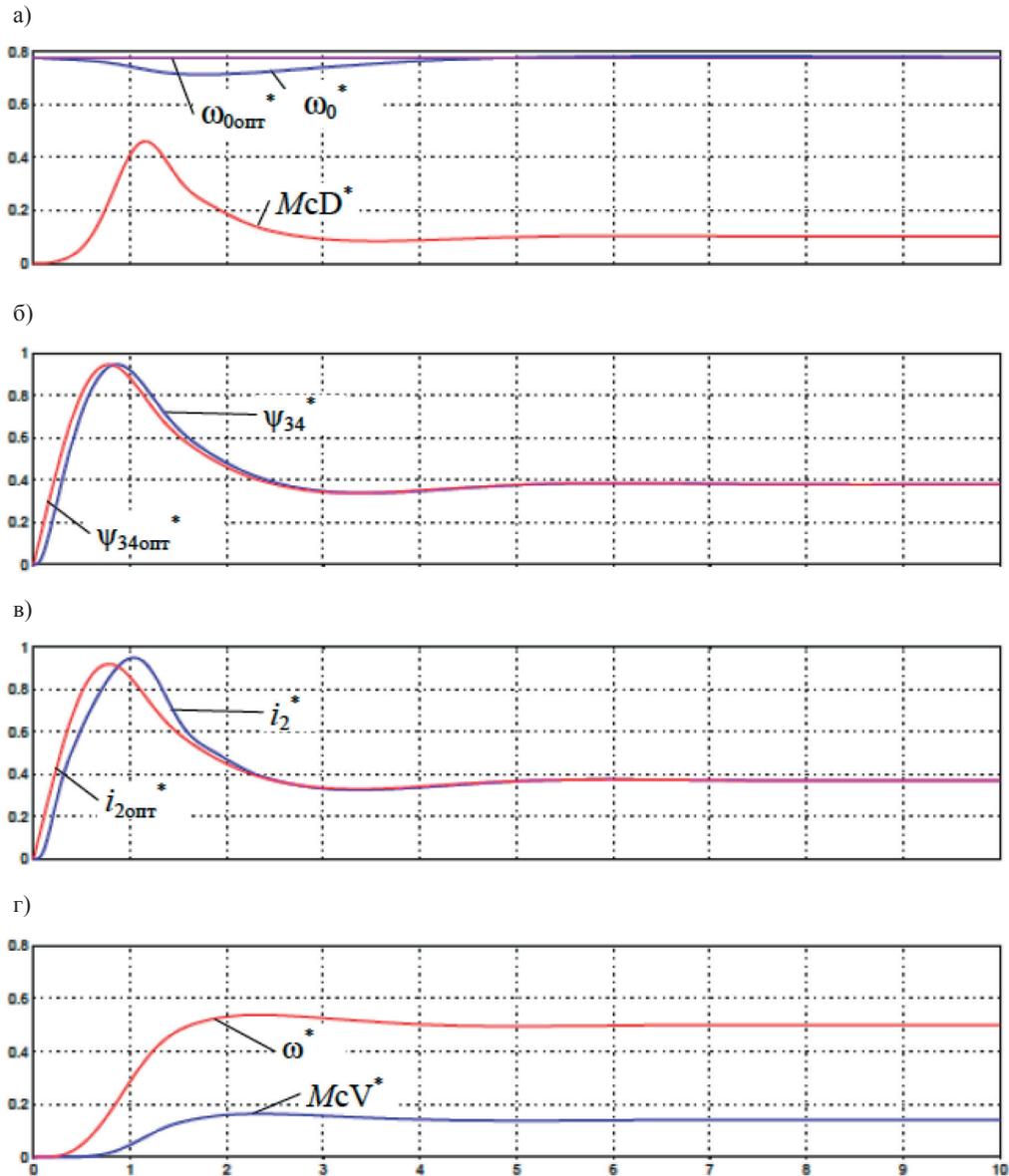


Рис. 7. Переходные характеристики переменных состояния ГЭУ с униполярными машинами $\omega_3^* = 0,5$:

а — реакция дизель-генератора; б — возбуждение ГЭД;

в — ток якорей униполярных машин; г — выходные характеристики ГЭД

Условные обозначения: ω_{0opt} , ω_0 — соответственно заданная оптимальная и фактическая скорость вращения дизель-генератора; McD , McV — соответственно моменты сопротивления на валу дизеля и на винте (вала гребного электродвигателя); Ψ_{34opt} , Ψ_{34} — соответственно заданное и фактическое значение потокосцепления обмотки возбуждения гребного электродвигателя;

i_{2opt} , i_2 — соответственно заданный и фактический ток якорей униполярных машин;

ω — скорость вращения винта (вала гребного электродвигателя)

Обсуждение (Discussion)

При анализе поведения переменных состояния системы управления ГЭУ было проведено сравнение значений потерь энергии в различных режимах управления. Режиму оптимального управления был сопоставлен режим раздельного управления, когда скорость вращения дизеля ω_0 и ток намагничивания ГЭД i_4^* поддерживаются на номинальном уровне. По результатам моделирования получены переходные характеристики потерь гребной дизель-электрической установки с униполярными машинами (рис. 6).

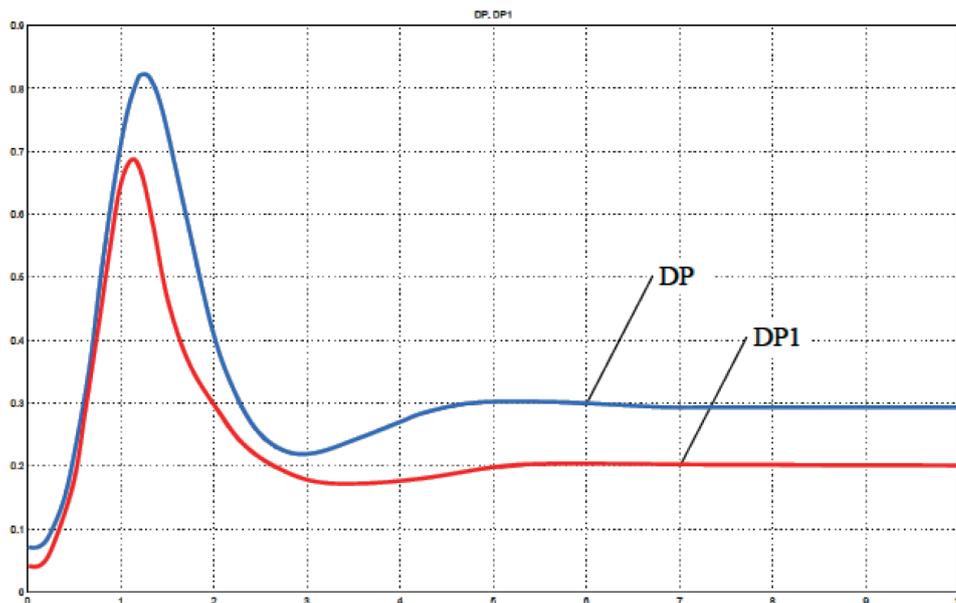
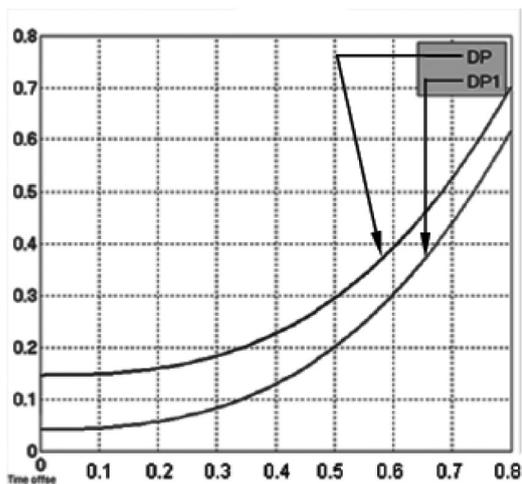


Рис. 6. Переходная характеристика потерь ГЭУ с униполярными машинами при $\omega_3^* = 0,5$:
 DP — потери при классическом раздельном управлении;
 DP1 — потери при оптимальном управлении

Аналогично была построена зависимость потерь энергии ГЭУ от скорости вращения винта в установившемся режиме (рис. 7).

а)



б)

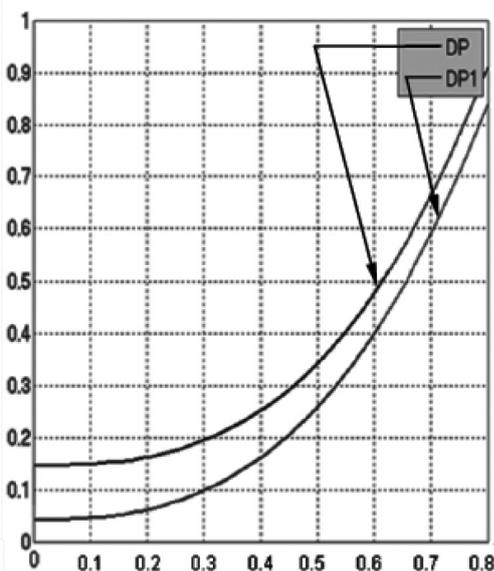


Рис. 7. Зависимость потерь от скорости вращения винта в установившемся режиме:
 а — работа винта в свободной воде; б — работа винта в швартовном режиме
 (DP — потери при раздельном управлении; DP1 — потери при оптимальном управлении)

Заключение (Conclusion)

В целом в установившихся и динамических режимах, при заданной скорости вращения винта ω менее номинальной, система оптимального управления ГЭУ поддерживает потери энергии в гребной дизель-электрической установке с униполярными машинами на минимальном уровне. При увеличении скорости вращения винта потери квадратично увеличиваются и в номинальном

режиме стремятся к единице. При этом эффективность оптимального управления сохраняется во всем диапазоне регулирования и составляет порядка 5 – 13 %, что отражает экономию энергии и топлива соответственно.

Предложенный подход показывает высокую эффективность построения и применения оптимальных систем управления по критерию минимума потерь энергии при передаче её от теплового двигателя к движителю (винту) в судовых электроэнергетических системах с системой электродвижения судна с применением униполярных машин. Перспективой развития данного подхода к синтезу оптимального управления является применение его на других типах ГЭУ и использование данного вида управления в современных судовых электроэнергетических системах, что в итоге позволит поднять энергоэффективность судов с электродвижением на более высокий уровень.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гильмияров Е. Б.* Многокритериальный подход к выбору судовой энергетической установки / Е. Б. Гильмияров, В. В. Цветков // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2006. — Т. 9. — № 3. — С. 502–513.
2. *Кориунов В. Н.* Перспективы развития судовых электроэнергетических систем / В. Н. Кориунов, Т. Е. Кувшинов, А. Н. Шеин // Вологодские чтения. — 2008. — № 69. — С. 139–145.
3. *Романовский В. В.* Перспективы модернизации гребных электрических установок ледоколов / В. В. Романовский, В. С. Иванов, А. И. Лебедев // Морской вестник. — 2013. — № 2S (11). — С. 56–59.
4. *Шарашкин С. В.* Перспективы использования различных электродвигателей в гребном электроприводе / С. В. Шарашкин // Материалы VII межвузовской науч.-практ. конф. аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России» 18 мая 2016 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 79–82.
5. *Шутова Д. И.* ВТСП устройства / Д. И. Шутова // Сверхпроводники для электроэнергетики: инф. бюл. — М.: Изд-во РНЦ «Курчатовский институт». — 2008. — Т. 5. — Вып. 3. — С. 1–2.
6. *Захарова Е. И.* Высокотемпературные сверхпроводящие электродвигательные установки для применения на флоте / Е. И. Захарова, М. А. Зингер, И. В. Захаров // Молодой ученый. — 2016. — № 28 (132). — С. 82–85.
7. *Ковалев Л. К.* Анализ состояния зарубежных и отечественных разработок по созданию сверхпроводниковых электрических машин / Л. К. Ковалев, К. Л. Ковалев, И. П. Колчанова // Электричество. — 2013. — № 1. — С. 2–12.
8. *Бровцинова Л. М.* Перспективность гребных электрических установок с униполярными машинами / Л. М. Бровцинова, В. Ф. Самосейко, А. В. Саушев, А. Ю. Румянцев // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. — 2014. — № 7. — С. 37–39.
9. *Иванченко А. А.* Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов / А. А. Иванченко, А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3(31). — С. 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.
10. *Румянцев А. Ю.* Решение задачи оптимального управления динамической системой, обеспечивающее желаемые переходные процессы / А. Ю. Румянцев, В. Ф. Самосейко // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. — 2015. — Т. 2. — № 4. — С. 92–94.
11. *Яровенко В. А.* Системный подход к вопросам проектирования гребных энергетических установок / В. А. Яровенко // Проблемы техники. — 2013. — № 2. — С. 82–94.
12. *Farhani F. C.* Electric drive control: multi-level optimization efficiency / F. Farhani, C. Ben Reagaya, A. Zaafouri, A. Chaari // The Fourth International Renewable Energy Congress. — 2012. — Pp. 894–898.
13. *Regaya C.B.* Loss-minimizing with backstepping technique control for induction motors and on line adaptation of the stator and rotor resistance / C.B. Regaya, A. Zaafouri, A. Chaari // Middle East Journal of Scientific Research. — 2013. — Vol. 15. — Is. 3. — Pp. 389–397.
14. *Анисимов А. А.* Формирования критерия оптимальности в задачах синтеза регуляторов состояния электромеханических систем / А. А. Анисимов, С. В. Тарарыкин // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2009. — № 10. — С. 36–41.

15. Геча В. Я. Конструкция магнитоэлектрической униполярной микромашины / В. Я. Геча, А. Б. Захаренко, А. К. Надкин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. — 2015. — Т. 146. — № 3. — С. 3–8.

16. Пугачев А. А. Минимизация мощности потерь в электроприводе со скалярной системой управления асинхронным двигателем / А. А. Пугачев // Вестник Череповецкого государственного университета. — 2015. — № 3 (64). — С. 32–37.

17. Попов А. Н. Энергосберегающие регуляторы для систем автоматизированного электропривода / А. Н. Попов // Инженерный вестник Дона. — 2016. — Т. 43. — № 4 (43). — С. 55.

18. Румянцев А. Ю. Оптимальное управление в системах электродвижения судов по критерию минимума потерь / А. Ю. Румянцев, В. Ф. Самосейко, Н. В. Белоусова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 206–213. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-206-213.

19. Саушев А. В. Параметрический синтез электротехнических устройств и систем / А. В. Саушев. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 315 с.

20. Григорьев А. В. Компьютерное моделирование и исследование единой электроэнергетической системы в среде Simulink / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 185–191. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-185-191.

REFERENCES

1. Gil'miyarov, E.B., and V.V. Tsvetkov. "Mnogokriterial'nyi podkhod k vyboru sudovoi energeticheskoi ustanovki." *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 9.3 (2006): 502–513.

2. Korshunov, V.N., T.E. Kuvshinov, and A.N. Shein. "Perspektivy razvitiya sudovykh elektroenergeticheskikh system." *Vologdinskije chteniya* 69 (2008): 139–145.

3. Romanovskii, V.V., V.S. Ivanov, and A.I. Lebedev. "Perspektivy modernizatsii grebnykh elektricheskikh ustanovok ledokolov." *Morskoi vestnik* 2S(11) (2013): 56–59.

4. Sharashkin, S.V. "Perspektivy ispol'zovaniya razlichnykh elektrodvigateli v grebnoy elektroprivode." *Materialy VII mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii aspirantov, studentov i kursantov «Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii» 18 maya 2016 goda*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2016. 79–82.

5. Shutova, D. I. "HTSC DEVICES." *The Bulletin "Superconductors for power engineering"* 5.3 (2008): 1–2.

6. Zakharova, E.I., M.A. Zinger, and I.V. Zakharov. "Vysokotemperaturnye sverkhprovodyashchie elektrodvigatel'nye ustanovki dlya primeneniya na flote." *Molodoi uchenyi* 28(132) (2016): 82–85.

7. Kovalev, L.K., K.L. Kovalev, and I.P. Kolchanova. "Analiz sostoyaniya zarubezhnykh i otechestvennykh razrabotok po sozdaniyu sverkhprovodnikovyykh elektricheskikh mashin." *Elektrichestvo* 1 (2013): 2–12.

8. Brovtsinova, L.M., V.F. Samoseyko, A.V. Saushev, and A.Yu. Rummyantsev. "Prospects of rowing electrical units with unipolar cars." *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy i puti ikh resheniya* 7 (2014): 37–39.

9. Ivanchenko, A.A., A.P. Petrov, and G.E. Zhivlyuk. "Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.

10. Rummyantsev, A.Y., and V.F. Samoseyko. "Solution of the Problem of Optimal Control of a Dynamic System that Provides the Desired Transient Response." *Russian Internet Journal of Electrical Engineering* 2.4 (2015): 92–94.

11. Yarovenko, V.A. "Sistemnyi podkhod k voprosam proektirovaniya grebnykh energeticheskikh ustanovok." *Problemi tekhniki* 2 (2013): 82–94.

12. Farhani, F.C., C. Ben Reagaya, A. Zaafouri, and A. Chaari. "Electric drive control: multi-level optimization efficiency." *The Fourth International Renewable Energy Congress* (2012): 894–898.

13. Regaya, C.B., A. Zaafouri, and A. Chaari. "Loss-minimizing with backstepping technique control for induction motors and on line adaptation of the stator and rotor resistance." *Middle East Journal of Scientific Research* 15.3 (2013): 389–397.

14. Anissimov, A.A., and S.V. Tararykin. "The Forming of Optimization Criterion in the Problems of Parametric Synthesis of the State Regulators in Electromechanical Systems." *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* 10 (2009): 36–41.

15. Gecha, V.Ya., A.B. Zakharenko, and A.K. Nadkin. “Konstruktsiya magnitoelektricheskoi unipolyarnoi mikromashiny.” *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEМ* 146.3 (2015): 3–8.

16. Pugachev, A. A. “Minimizatsiya moshchnosti poter’ v elektroprivode so skalyarnoi sistemoi upravleniya asinkhronnym dvigatelem.” *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* 3(64) (2015): 32–37.

17. Popov, A.N. “Energy saving regulators for systems of the automated electric drive.” *Engineering journal of Don* 43.4(43) (2016): 55.

18. Rumyantsev, Alexey Yurevich, Veniamin Frantsevich Samoseiko, and Nadezhda Vladislavovna Belousova. “Optimal control of the electric propulsion systems of vessels on the criterion of minimum losses.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(40) (2016): 206–213. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-206-213.

19. Saushev, A. V. *Parametricheskii sintez elektrotekhnicheskikh ustroystv i sistem*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2013.

20. Grigor’ev, A.V., and E. A. Glekler. “Computer simulation and research of the integrated electric power system in Simulink.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(30) (2015): 185–191. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-185-191.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Румянцев Алексей Юрьевич —
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_electroprivod@gumrf.ru,
stehnika@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rumyantsev, Aleksey Yu. —
Senior Lecturer
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_electroprivod@gumrf.ru,
stehnika@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 17 июля 2018 г.
Received: July 17, 2018.*