

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ СУДОВ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ПОТЕРЬ

Задача оптимального управления в системе электродвижения судна по критерию минимума потерь, обеспечивающего желаемые переходные процессы и заданное значение выходной целевой функции, решена с использованием методов теории автоматического регулирования. Судовая электроэнергетическая система судна с системой электродвижения рассмотрена как совокупность подсистем управления в соответствии с основными элементами судовой системы. Сформулирована цель оптимального управления — повышение эффективности передачи энергии от двигателя к движителю за счет снижения потерь энергии. При этом судовая электроэнергетическая система с системой электродвижения рассмотрена как единая система с множеством переменных управления, каждая из которых настроена на свой оптимум. Предложено решение задачи оптимального управления как совокупность систем с контурами оптимального управления, настроенных на технический оптимум, и оптимальным регулятором. Представлена структура построения системы оптимального управления динамической системы. Получено аналитическое решение для формирования оптимального регулятора с оптимальным управлением. Построена математическая модель судовой электроэнергетической системы с системой электродвижения гребной дизель-электрической установки с униполярными машинами. Для реализации был использован математический редактор SIMULINK (приложение MATLAB). При этом целевой выходной функцией была принята скорость вращения винта. Проведено исследование работы модели при раздельном управлении подсистемами и оптимального управления по критерию минимума потерь энергии. Показана эффективность построения оптимальных систем управления при передаче энергии от теплового двигателя к исполнительному механизму, зависимости потерь от скорости вращения винта по сравнению с раздельным управлением системами судна.

Ключевые слова: система электродвижения судна, математическая модель судовой электроэнергетической системы, гребная дизель-электрическая установка с униполярными машинами, функция оптимального управления, оптимальный регулятор, критерий минимизации потерь энергии, эффективность построения оптимальных систем управления.

Введение

В судовых электроэнергетических системах (СЭЭС) с системой электродвижения (СЭД) существует множество устройств, объединенных процессом производства, преобразования, распределения и приема электроэнергии (рис. 1) [1]. Каждое устройство призвано выполнять свою функцию, и поэтому имеет свои переменные управления, состояния и выходную функцию. В целом, управление переменными системы электродвижения призвано обеспечить основную целевую функцию: скорость вращения винта или поддержание момента на валу. В совокупности СЭЭС с СЭД обеспечивает передачу произведенной энергии двигателя через устройства перераспределения к движителю винту судна и является наиболее перспективной для энергоемких судовых систем [2].

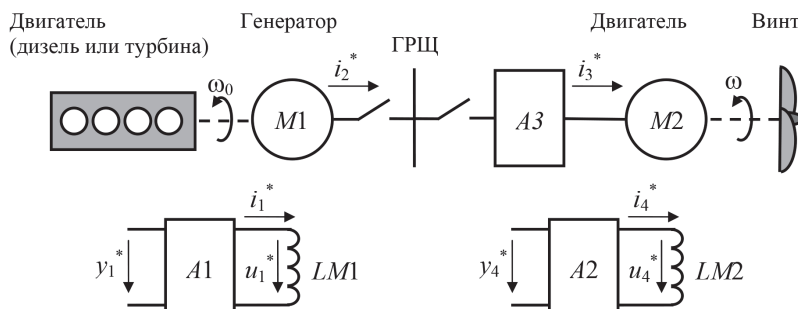


Рис. 1. Структурно-функциональная схема судовой электроэнергетической системы с системой электродвижения

В СЭЭС можно выделить следующие подсистемы управления согласно ее элементам:

1) система управления частотой вращения генерирующей установки. В ее задачу входит поддержание стабильной частоты вращения дизеля или турбины и генератора;

2) система управления уровнем генерируемого напряжения. Это системы возбуждения генераторов;

3) системы преобразования электроэнергии. С точки зрения управления — это управляемые выпрямители, инверторы тока и напряжения, непосредственные преобразователи частоты. Выходными переменными данных устройств являются уровень и частота напряжения (тока) подводимые к гребному электродвигателю;

4) система управления приемником электроэнергии гребным электродвигателем. Имеет несколько переменных управления в зависимости от типа электродвигателя. В основном — это переменные, управляющие потоком возбуждения и током нагрузки.

В классической системе электродвижения судна при раздельном управлении каждая подсистема управления функционирует как локальная замкнутая система без учета состояния других подсистем. С точки зрения эффективности передачи произведенной энергии от двигателя к движителю, такое управление не является оптимальным, потому как подразумевает поддержание переменных состояния каждой подсистемы на номинальных уровнях, кроме одной переменной, обеспечивающей основную выходную целевую функцию. Так, поддержание номинальных оборотов дизель-генератора ведет к дополнительному расходу топлива, поддержание номинальных значений возбуждения генератора или электродвигателя — к дополнительным потерям на возбуждение, т. е. СЭЭС с СЭД настроены так, чтобы максимально быстро доставить необходимую мощность на винт, хотя в таком режиме судно работает не всегда.

Проблему обеспечения эффективности передачи энергии и уменьшения потерь решают различными многокритериальными подходами к выбору структуры СЭЭС [3] – [5], такими как дробление мощности дизель-генераторов или турбогенераторов, разделение их по мощности на режимы маневрирования и крейсерского хода или применение многодвигательной системы. Это ведет к увеличению массогабаритных показателей и увеличению потерь.

Цель оптимального управления СЭЭС с СЭД — максимально эффективно передать произведенную мощность от двигателя к движителю (винту) с минимальными потерями электроэнергии в целом. Это возможно, если рассматривать СЭЭС с СЭД как единую систему с множеством переменных управления, каждая из которых настроена на свой оптимум, обеспечивая критерий оптимальности: минимум потерь при сохранении значения выходной целевой функции.

Основная часть

Решение данной задачи связано с определенными сложностями. Полученная оптимальная зависимость управления в большинстве случаев не имеет аналитического решения для нелинейных систем, а решение для линейных систем может быть получено только численными методами 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. В связи с этим рассматриваются различные подходы к решению данных задач [6] – [8].

Предлагается решение задачи оптимального управления следующим образом. Рассмотрим СЭЭС с СЭД как динамическую систему, которая описывается системой дифференциальных уравнений

$$\dot{X} = f(U, X_1, X_2), \quad (1)$$

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:

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

Выбор параметров регуляторов может быть выполнен с использованием корневых методов.

Будем полагать, что переходная характеристика желаемого динамического процесса может быть аппроксимирована экспоненциальной функцией. При этом входные переменные $X_{1\text{опт}}^0$ будут задавать выходные переменные X_1 .

В результате формирования желаемого динамического поведения подсистем исходная система дифференциальных уравнений примет следующий вид (рис. 2):

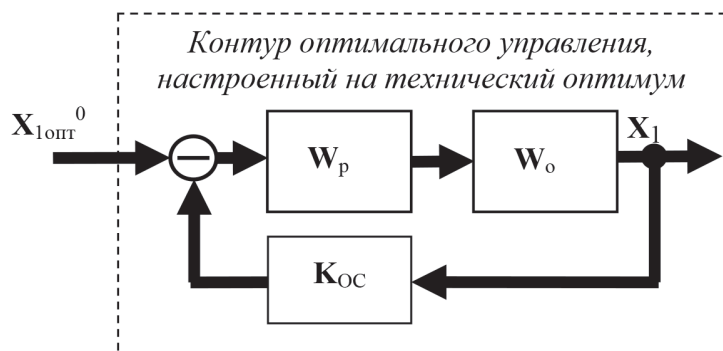


Рис. 2. Формирование желаемых переходных характеристик СЭЭС с СЭД методами последовательной коррекции:

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

$$pX = f_0(X_{1\text{опт}}^0, X_1, X_2), \quad (2)$$

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:

$$\Delta P(X_{11}, X_{12}, X_2). \quad (3)$$

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

$$M = f_m(X_{11}), \quad (4)$$

которая является функцией переменных состояния $X_{11} \in X_1$. Дополнение вектора X_{11} до вектора X_1 обозначим X_{12} : $X_{11} \cup X_{12} = X_1$.

Из выражения (4) можно найти один из элементов вектора X_{11} , например

$$x_1 = M \cdot f_m^{-1}(X_{11}'), \quad (5)$$

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

Используя введенные обозначения, переформируем функцию оптимального управления (3) в следующий вид:

$$\Delta P(M \cdot f_m^{-1}(X_{11}'), X_{11}', X_{12}, X_2) = \Delta P_m(M, X_1', X_2), \quad (6)$$

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 (2) 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 (6). В результате получим функцию в следующем виде:

$$\Delta P_M(M, X_1', f_2(X_1)) = \Delta P_A(M, X_1'). \quad (7)$$

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

$$D\Delta P_A = \frac{\partial \Delta P_A(M, X_1')}{\partial X_1'}.$$

Положим, что существует вектор X_1' , который обращает элементы вектора производных $D\Delta P_A$ в ноль:

$$D\Delta P_A = \frac{\partial \Delta P_A(M, X_1')}{\partial X_1'} = 0.$$

Тогда в пространстве, заданном вектором X_1' существует оптимальное состояние, минимизирующее функцию оптимального управления (7).

В этом случае вектор управляющих воздействий $X_{\text{опт}}^{0'} = X_1'$ и находится путем решения уравнения

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

где $X_{\text{опт}}^{0'}$ — вектор $X_{\text{опт}}^0$ без элемента x_1^0 . Элемент x_1^0 может быть найден из выражения (5).

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

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

В итоге система оптимального управления примет следующий вид (рис. 3):

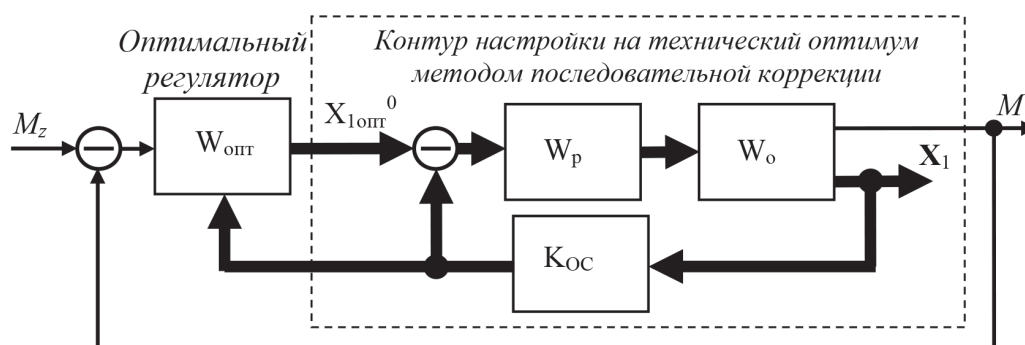


Рис. 3. Система оптимального управления динамической системой:

W_o — передаточная функция объекта управления; W_p — передаточная функция регулятора; $W_{\text{опт}}$ — передаточная функция оптимального регулятора; $K_{\text{ос}}$ — вектор пропорциональной обратной связи; M_z — заданное значение целевой функции M

Данный результат построения оптимального управления в СЭД судов позволяет найти и сформировать управляющие воздействия каждой подсистемы СЭЭС, которые в целом миними-

зируют функцию оптимального управления, поддерживают заданное значение целевой функции. Переход же от одного оптимального состояния системы к другому оптимальному состоянию происходит по желаемым динамическим процессам [9], которые протекают с заданным перерегулированием и максимальным быстродействием. Способ применим также для формирования оптимального управления в кусочно-линейных динамических системах.

Согласно данному подходу была построена математическая модель СЭЭС с СЭД гребной дизель-электрической установки с униполярными машинами (рис. 4), которые являются одними из перспективных машин, применяемых при проектировании гребных электрических установок [10].

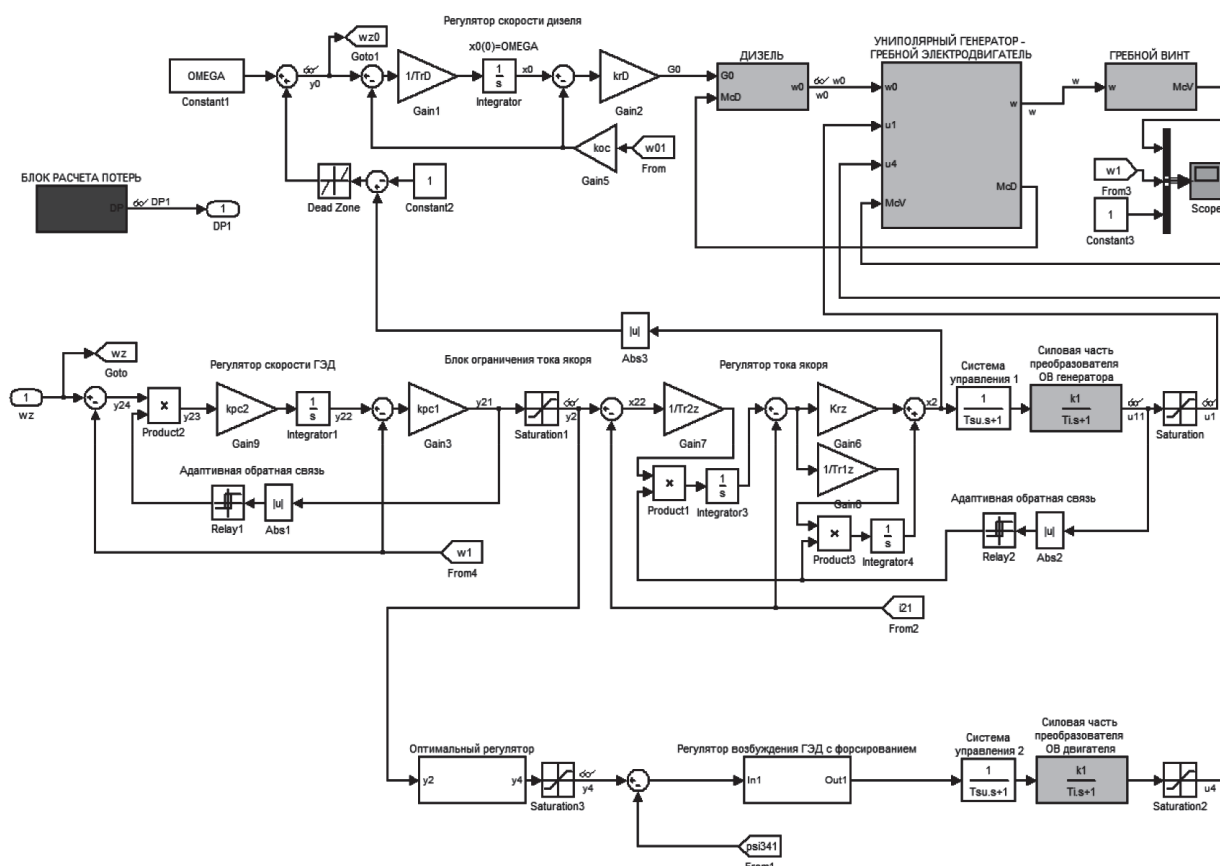


Рис. 4. Структурная схема управления математической модели гребной дизель-электрической установкой с униполярными машинами

В качестве критерия оптимального управления принята суммарная величина потерь энергии в элементах канала дизель – генератор – двигатель и преобразователях соответственно

$$\Delta P_D, \Delta P_G, \Delta P_M, \Delta P_V;$$

$$\Delta P = \Delta P_D + \Delta P_{MGV}$$

где $\Delta P_{MGV} = \Delta P_M + \Delta P_G + \Delta P_V$ — потери энергии в двигателе, генераторе и преобразователе.

Для реализации был использован математический редактор SIMULINK (приложение MATLAB), который наиболее полно позволяет провести моделирование и исследование [11]. Целевой выходной функцией была принята скорость вращения винта. Построены математические модели всех элементов гребной электрической установки: дизеля, генератора, двигателя, винта [12]. Методами последовательной коррекции сформированы контуры управления дизелем, униполярного генератора и двигателя. Раздельные контуры управления элементами СЭЭС соответствуют желаемым переходным характеристикам и имеют нулевую статическую ошибку. Затем для построения системы оптимального управления СЭЭС один из контуров управления свя-

зывается с задающим значением, а остальное управление контуров вычисляется оптимальными регуляторами по заданному критерию минимума потерь исходя из текущих значений переменных состояния. В полученной модели с задающим значением частоты вращения винта w_z связан контур управления возбуждения генератора, а скорость вращения дизеля w_0 и возбуждение гребным электродвигателем вычисляются оптимальными регуляторами. Для анализа величины потерь в системе был создан отдельный блок расчета суммарных потерь.

Выводы

По результатам моделирования получены динамические и статические зависимости потерь энергии от скорости вращения винта в различных режимах: оптимального управления и классического — при раздельном управлении подсистемами СЭЭС. Зависимости потерь от скорости вращения винта в установившемся режиме при работе винта в свободной воде и в швартовом режиме представлены на рис. 5. Исследования показывают, что экономия энергии составляет около 5 – 13 %.

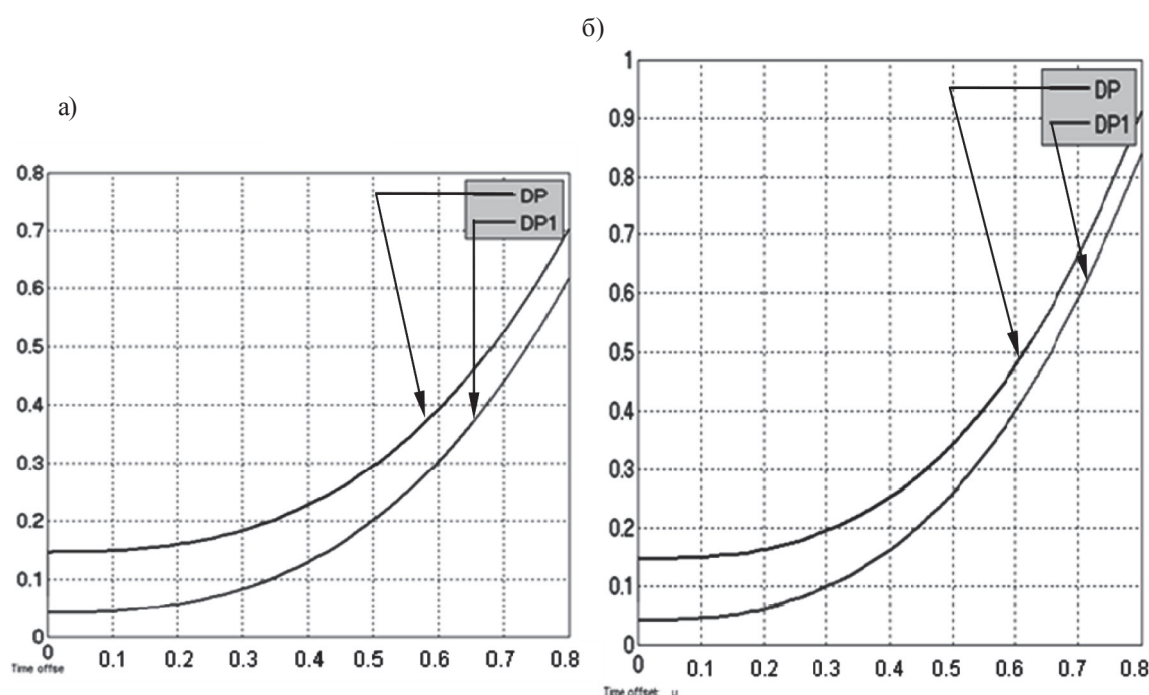


Рис. 5. Зависимость потерь от скорости вращения винта в установившемся режиме:
а — работа винта в свободной воде; б — работа винта в швартовом режиме,
где DP — потери при раздельном управлении, DP1 — потери при оптимальном управлении

Данный подход показывает эффективность построения оптимальных систем управления по критерию минимума потерь энергии при её передаче от теплового двигателя к исполнительному механизму в судовых электроэнергетических системах с системой электродвижения судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А. В. Анализ возможности и целесообразности применения систем электродвижения на судах вспомогательного флота / А. В. Григорьев, Р. Р. Зайнуллин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 40–46.
2. Коршунов В. Н. Перспективы развития судовых электроэнергетических систем / В. Н. Коршунов, Т. Е. Кувшинов, А. Н. Шеин // Вологдинские чтения. — 2008. — № 69. — С. 139–145.
3. 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.

4. Яровенко В. А. Системный подход к вопросам проектирования гребных энергетических установок / В. А. Яровенко // Проблемы техники. — 2013. — № 2. — С. 82–94.
5. Kumar L. Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review / L. Kumar, S. Jain // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2014. — Vol. 29. — Pp. 924–940. DOI: 10.1016/j.rser.2013.09.014.
6. Жадобин Н. Е. Нечеткие регуляторы в системах управления судовыми энергетическими установками / Н. Е. Жадобин, А. И. Лебедев, О. Г. Данилов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 62–68.
7. Китаева С. А. Синтез оптимальной системы управления вентильной гребной электрической установкой в условиях действия случайного морского волнения / С. А. Китаева, К. В. Чупина // Научные труды Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. — 2007. — № 19. — С. 59–64.
8. Саушев А. В. Параметрический синтез электротехнических устройств и систем / А. В. Саушев. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 315 с.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Романовский В. В. Выбор основных параметров электрических машин для гребных электрических установок / В. В. Романовский, М. А. Сюбаев, И. М. Болвашенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 172–178.

OPTIMAL CONTROL OF THE ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS OF VESSELS ON THE CRITERION OF MINIMUM LOSSES

The problem of optimal control system for ship propulsion criterion of minimum losses, providing the desired transients and the target value of the output of the objective function is solved using the methods of automatic control theory. Ship power system with the ship propulsion system is considered as a set of management subsystems in accordance with the basic elements of the ship's systems. Formulated the goal of optimal control as increasing efficiency of energy transfer from the engine to the mover by reducing energy losses. This ship power system with electric propulsion system is considered as a single system with a plurality of control variables, each of which is tuned to its optimum. A solution to the optimal control problem as a set of systems with optimal control circuits tuned to optimum technical and optimal control. The structure for constructing an optimal control system of a dynamic system. An analytical solution for the formation of the optimal controller with optimal control. A mathematical model of the ship's electric power system with a system of electric propulsion diesel-electric propulsion units with unipolar machines. Mathematics Editor SIMULINK (MATLAB application) was used for implementation. At the same time the speed of rotation of the screw was adopted target output function. A study of the model with separate control subsystems and optimal control on the criterion of a minimum energy loss. The efficiency of constructing optimal control systems in the transmission of energy from the heat engine to an actuator in the form of loss of dependency on the rotational speed of the screw in comparison with the separate management vessel systems.

Keywords: ship propulsion system, the mathematical model of the ship's electric power system, rowing diesel-electric system with unipolar machines feature optimal control, optimal control, the criterion of minimizing energy losses, effects of constructing optimal control systems.

REFERENCES

1. Grigorev, A. V., and R. R. Zajnullin. "Analysis of possibility and expediency of using of electrical propulsion plants on ships for auxiliary fleet." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(27) (2014): 40–46.

2. Korshunov, V. N., T. E. Kuvshinov, and A. N. Shein. "Perspektivy razvitiya sudovyh jelektrojenergeticheskikh system." *Vologdinskie chtenija* 69 (2008): 139–145.
3. Gilmijarov, E. B., and V. V. Cvetkov. "Mnogokriterialnyj podhod k vyboru sudovoj jenergeticheskoy ustanovki." *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta* 9.3 (2006): 502–513.
4. Jarovenko, V. A. "Sistemnyj podhod k voprosam proektirovaniya grebnyh jenergeticheskikh ustanovok." *Problemi tehniki* 2 (2013): 82–94.
5. Kumar, Lalit, and Shailendra Jain. "Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29 (2014): 924–940. DOI: 10.1016/j.rser.2013.09.014.
6. Zhadobin, N. E., A. I. Lebedev, and O. G. Danilov. "Nechetkie reguljatory v sistemah upravlenija sudovymi jenergeticheskimi ustanovkami." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rečnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(25) (2014): 62–68.
7. Kitaeva, S. A., and K. V. Chupina. "Sintez optimalnoj sistemy upravlenija ventilnoj grebnoj jelektricheskoy ustanovkoj v uslovijah dejstvija sluchajnogo morskogo volnenija." *Nauchnye trudy Dalnevostochnogo gosudarstvennogo tehničeskogo rybohozjajstvennogo universiteta* 19 (2007): 59–64.
8. Saushev, A. V. *Parametricheskij sintez jelectrotehničeskikh ustrojstv i sistem*. SPb.: Gosudarstvennyj universitet morskogo i rečnogo flota im. admirala S.O. Makarova, 2013.
9. 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.
10. Brovtšinova, L. M., V. F. Samoseyko, A. V. Saushev, and A. Yu. Rummyantsev. "Prospects of rowing electrical units with unipolar cars." *Sovremennaja nauka: aktualnye problemy i puti ih reshenija* 7 (2014): 37–39.
11. Grigorev, A. V., and E. A. Glekler. "Computer simulation and research of the integrated electric power system in Simulink." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rečnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(30) (2015): 185–191.
12. Romanovskiy, Viktor Viktorovich, Mirza Alimovich Sjubayev, and Igor Markovich Bolvashenkov. "Selection basic data of electrical machines for electrical propulsion systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rečnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(34) (2015): 172–178.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Румянцев Алексей Юрьевич —
старший преподаватель.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
stehnika@mail.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Самосейко Вениамин Францевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Белюсова Надежда Владиславовна —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_electroprivod@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Rummyantsev Alexey Yurevich —
Senior Lecturer.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
stehnika@mail.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Samoseiko Veniamin Frantsevich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Belousova Nadezhda Vladislavovna —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 1 ноября 2016 г.