

УДК 681.516.77: 621.313.12-883

В.В. ДАНИК, О.К. КОЛЕБАНОВ
Херсонська державна морська академія
Ю.О. ЛЕБЕДЕНКО
Херсонський національний технічний університет

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ СУДНОВИМИ КОМБІНОВАНИМИ ПРОПУЛЬСИВНИМИ КОМПЛЕКСАМИ

Стаття присвячена розв'язанню задачі оптимального керування судновими комбінованими пропульсивними комплексами з диференційними привод-генераторними агрегатами з метою підвищення їх ефективності.

У роботі виконано аналіз структури суднового пропульсивного комплексу як гідромеханічної системи, що включає корпус судна і пропульсивну установку, в якій енергія робочого тіла перетворюється в упор, що приводить в рух корпус судна, обґрунтовано перспективність впровадження комбінованих пропульсивних комплексів, в яких застосовуються кілька різномісних двигунів, що працюють на один або кілька рушіїв.

Розглянуто математичну модель процесу керування судновим комбінованим пропульсивним комплексом, що дозволяє проводити аналіз роботи валогенераторної установки з диференційним привод-генераторним агрегатом, як при ходовому, так і при аварійному режимі функціонування.

Формалізовано завдання керування судновими комбінованими пропульсивними комплексами на основі критерія узагальненої оцінки якості їх функціонування, що враховує відхилення ходового навантаження пропульсивного комплексу при обмеженнях щодо відхилення потужності бортової мережі від бажаної та сформульовано задачу оптимального керування судновими комбінованими пропульсивними комплексами за мінімумом відхилень механічної потужності при обмеженнях щодо забезпечення живлення споживачів.

Запропоновано новий метод оптимального керування частотним перетворювачем генератора опори, що забезпечує мінімізацію визначеного критерію із дотриманням відповідних обмежень. Алгоритм оптимального керування комбінованого пропульсивного комплексу включає: етапи аналізу значень заданої та діючої механічної потужності на гвинті судна; визначення електричної потужності, що виробляється допоміжною енергетичною установкою судна та споживаної у відповідному режимі; обчислення керування перетворювачем частоти, що забезпечує за рахунок підтримання відповідної потужності генератора опори мінімум відхилення потужності на гвинті при забезпеченні необхідного енергетичного балансу електромережі судна.

Враховуючи випадковий характер навантажень, як з боку електричної енергосистеми, так і безпосередньо рухової установки, що ускладнює реалізацію представленого алгоритму оптимального управління в реальному часі, обґрунтовано доцільність застосування нечітких алгоритмів для підвищення ефективності процесів керування.

Отримані результати можуть бути використані при побудові вискоефективних систем керування судновими комбінованими пропульсивними комплексами для покращення якісних показників електричної енергії в судновій енергетичній системі та забезпечення працездатності суднової енергосистеми при аварійних ситуаціях.

Ключові слова: математична модель, судновий пропульсивний комплекс, диференціальний привод, валогенератор, оптимальне керування, регулятор.

В.В. ДАНЫК, А.К. КОЛЕБАНОВ
Херсонская государственная морская академия
Ю.А. ЛЕБЕДЕНКО
Херсонский национальный технический университет

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СУДОВЫМИ КОМБИНИРОВАННЫМИ ПРОПУЛЬСИВНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ

Статья посвящена решению задачи оптимального управления судовыми комбинированными пропульсивными комплексами с дифференциальными привод-генераторными агрегатами с целью повышения их эффективности.

В работе выполнен анализ структуры судового пропульсивного комплекса как гидромеханической системы, включающей корпус судна и пропульсивную установку, в которой энергия

рабочего тела превращается в упор, приводит в движение корпус судна, обосновано перспективность внедрения комбинированных пропульсивных комплексов, в которых применяются несколько разнотипных двигателей, работающих на один или несколько двигателей.

Рассмотрена математическая модель процесса управления судовым комбинированным пропульсивным комплексом, позволяющим проводить анализ работы валогенераторной установки с дифференциальным привод-генераторным агрегатом, как при ходовом, так и при аварийном режиме функционирования.

Формализована задача управления судовыми комбинированными пропульсивными комплексами на основе критерия обобщенной оценки качества их функционирования, учитывающего отклонения ходовой нагрузки пропульсивного комплекса при ограничениях по отклонению мощности бортовой сети от желаемой, сформулирована задача оптимального управления судовыми комбинированными пропульсивными комплексами по минимуму отклонений механической мощности при ограничениях по обеспечению питания потребителей.

Предложен новый метод оптимального управления частотным преобразователем генератора опоры, который обеспечивает минимизацию определенного критерия с соблюдением соответствующих ограничений. Алгоритм оптимального управления комбинированным пропульсивным комплексом включает: этапы анализа значений заданной и действующей механической мощности на винте судна; определение электрической мощности вспомогательной энергетической установкой судна и потребляемой в соответствующем режиме; вычисления управления преобразователем частоты, обеспечивает за счет поддержания соответствующей мощности генератора опоры минимум отклонения мощности на винте при обеспечении необходимого энергетического баланса электросети судна.

Учитывая случайный характер нагрузок, как со стороны электрической энергосистемы, так и непосредственно двигательной установки, что затрудняет реализацию представленного алгоритма оптимального управления в реальном времени, обоснована целесообразность применения нечетких алгоритмов для повышения эффективности процессов управления.

Полученные результаты могут быть использованы при построении высокоэффективных систем управления судовыми комбинированными пропульсивными комплексами, для улучшения качественных показателей электрической энергии в судовой энергетической системе и обеспечения работоспособности судовой энергосистемы при аварийных ситуациях.

Ключевые слова: математическая модель, судовой пропульсивный комплекс, дифференциальный привод, валогенератор, оптимальное управление, регулятор.

V.V. DANYK, O.K. KOLEBANOV
Kherson State Maritime Academy
Yu.O. LEBEDENKO
Kherson National Technical University

OPTIMAL CONTROL OF VESSEL COMBINED PROPULSIVE COMPLEXES

The article is devoted to solving the problem of optimal control of ship combined propulsion systems with differential drive-generator units in order to increase their efficiency.

The analysis of the structure of the ship propulsive complex as a hydromechanical system, including the ship's hull and propulsive installation, in which the energy of the working body is converted into an emphasis that drives the ship's hull, the substantiation of the prospects operating on one or more engines.

The mathematical model of the control process of the ship combined propulsive complex is considered, which allows to analyze the operation of the shaft generator set with the differential drive-generator unit both in running and in emergency mode.

The problem of control of ship combined propulsive complexes is formalized on the basis of the criterion of the generalized estimation of quality of their functioning that considers deviation of running load of a propulsive complex at restrictions concerning deviation of consumer's power supply.

A new method of optimal control of the frequency converter of the support generator is proposed, which ensures the minimization of a certain criterion with observance of the corresponding restrictions.

The algorithm of optimal control of the combined propulsive complex includes: stages of the analysis of values of the set and operating mechanical power on the vessel propeller; determination of electric power produced by the auxiliary power plant of the vessel and consumed in the appropriate mode; calculation of control of the frequency converter, which provides by maintaining the appropriate power of the support generator, the minimum deviation of power on the propeller while ensuring the required energy balance of the ship's power supply.

Given the random nature of loads from the electrical system and directly to the propulsion system, which complicates the implementation of the presented algorithm for optimal control in real time, the feasibility of using fuzzy algorithms to improve the efficiency of control processes.

The obtained results can be used in the construction of highly efficient control systems for marine combined propulsion systems, to improve the quality of electricity in the ship's energy system and to ensure the efficiency of the ship's power system in emergency situations.

Key words: mathematical model, ship propulsive complex, differential drive, shaft generator, optimal control, regulator.

Постановка проблеми

Сучасний етап розвитку і створення суден транспортного і промислового флотів різного призначення з широкою електрифікацією технічних засобів відзначається значним збільшенням потужностей суднових енергетичних установок при збереженні високих вимог до економічності, екологічності і надійності їх роботи, а також точності та швидкодії відповідних систем керування.

Одним з напрямків вирішення даної проблеми є розробка і впровадження комбінованих пропульсивних комплексів (КПК). З одного боку, КПК у режимі відбору потужності забезпечує використання головної енергетичної установки (ГЕУ) для виробництва електроенергії, що дозволяє відмовитися від експлуатації всіх або частини дизель-генераторів (ДГ) в ходових режимах функціонування судна. З іншого, застосування КПК дозволяють значно покращити динамічні властивості судна, забезпечити живлення споживачів у ходовому режимі та можуть забезпечувати аварійний хід судна у випадку відмови ГД [1].

Крім того, у цей час намітилися напрями в розвитку, удосконалюванні й застосуванні суднових енергетичних систем, що містять напівпровідникові перетворювачі частоти, зокрема відносно дослідження й впровадження їх в комбінованих електромеханічних пропульсивних комплексах. При цьому особлива увага приділяється питанням підвищення ефективності процесів керування, забезпечення надійності енергопостачання судна, створенню перспективного судового електроенергетичного обладнання за рахунок інтеграції його в єдину електроенергетичну систему [2].

У зв'язку з цим, вирішення проблеми підвищення ефективності процесів керування судновими комбінованими пропульсивними комплексами за рахунок впровадження методів оптимального керування є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Комбіновані пропульсивні комплекси з прямим відбором потужності включають валогенераторну установку, генератор якої під'єднано або безпосередньо, або через коробку передач до головної енергетичної установки. Одним з можливих рішень, що забезпечує задовільні масо-габаритні показники та дозволяє зменшити необхідну потужність силового перетворювача, є використання диференціального приводу [3], схематична діаграма якого наведена на рис. 1.

Схема містить диференційний механізм (ДМ) і дві електричні машини: синхронний генератор (СГ), генератор опори (ГО), що може працювати, як у генераторному, так і в двигуновому режимі в залежності від обраного режиму функціонування КПК. Узгодження ГО з енергосистемою судна здійснюється за рахунок обертового перетворювача частоти (ПЧ) та трансформатора з фільтром.

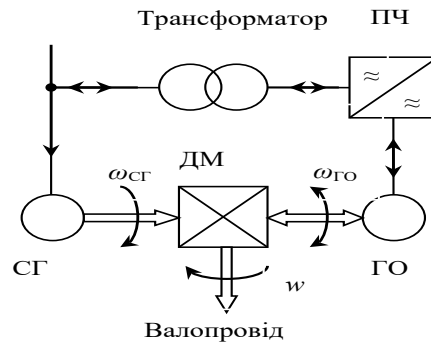


Рис. 1. Функціональна схема диференціального синхронного привід-генераторного агрегату

Розглянемо динамічну модель такого КПК [3, 4]. Рівняння руху, що описує процеси в диференціальному синхронному привід-генераторному агрегаті:

$$J_{\text{ПР1}} \cdot \frac{d\omega_{\text{СГ}}}{dt} - J_{\text{ПР2}} \cdot \frac{d\omega_{\text{ГД}}}{dt} = \frac{1}{2} \cdot M_{\text{ЕГО}} - M_{\text{ЕСГ}}, \quad (1)$$

де $J_{\text{ПР1}} = J_{\text{СГ}} + \frac{1}{i_2^2} \cdot J_{\text{ГО}}$ – приведений момент інерції до вала основного синхронного генератора; $J_{\text{ПР2}} = \frac{1}{i_2} \cdot J_{\text{ГО}}$ – приведений момент інерції до вала головного двигуна.

Рівняння напруг U , струмів I і електромагнітного моменту $M_{\text{ЕМ}}$ в синхронній машині зазвичай подається у виді системи рівнянь в осях d, q :

$$\begin{cases} U = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (u_d^2 + u_q^2)}; \\ I = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (i_d^2 + i_q^2)}; \\ M_{\text{ЕМ}} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\Psi_q \cdot i_d - \Psi_d \cdot i_q), \end{cases} \quad (3)$$

де u_d, u_q, i_d, i_q , – напруги і струми генератора по осях d, q ; Ψ_d, Ψ_q – потокозчеплення обмоток генератора.

Рівняння збудника синхронного генератора з активним опором r_{3B} і індуктивністю L_{3B} :

$$\begin{cases} u_{3B} = r_{3B} \cdot i_{3B} + L_{3B} \cdot \frac{di_{3B}}{dt}; \\ u_f = m_{uf} \cdot \frac{C_f}{k_u} \cdot i_{3B}. \end{cases} \quad (4)$$

Рівняння руху для випадку постійної частоти обертання вхідного вала:

$$\begin{cases} I_{\text{ПР}} \cdot \frac{d\Omega_1}{dt} = \frac{1}{i_2} \cdot M_{EM2} - M_{EM1}; \\ \Omega_1 = \frac{\omega_1}{P_1}. \end{cases} \quad (5)$$

Рівняння реактора:

$$U_{\text{ВЛХВ}} = U_{\text{ВХВ}} + r_p \cdot I_{\text{ВХВ}} + L_p \frac{dI_{\text{ВХВ}}}{dt}, \quad (6)$$

де $U_{\text{ВЛХВ}}$, $U_{\text{ВХВ}}$, $I_{\text{ВХВ}}$ – напруга на виході випрямляча генератора опори, напруга і струм на виході залежного інвертора з боку постійного струму; r_p , L_p – активний опір і індуктивність реактора.

В якості рівнянь зв'язку компонентів моделі використано залежності складових струмів синхронного генератора, навантаження і залежного інвертора:

$$\begin{cases} i_{dCG} = i_{dH} + i_{d3I}; \\ i_{qCG} = i_{qH} + i_{q3I}. \end{cases} \quad \begin{cases} i_{d33} = \sqrt{2} \cdot I_{3I} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{3I} - \theta\right); \\ i_{q33} = \sqrt{2} \cdot I_{3I} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{3I} - \theta\right). \end{cases} \quad (7)$$

Вираз для вихідного струму залежного інвертора:

$$\frac{di_{\text{ВХ3I}}}{dt} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot \frac{U_2 - U_1 \cdot \cos \beta}{L_p} - I_{\text{ВХ3I}} \cdot \frac{\frac{3}{\pi} \cdot (x_\gamma + x_{\text{ГО}}) + r_p}{L_p}. \quad (8)$$

Наведені рівняння, доповнені рівняннями навантаження, регуляторів частоти і напруги, є повною математичною моделлю диференціального синхронного привід-генераторного агрегату, що може бути використана як для аналізу судової енергетичної системи при дії комплексу факторів, що збурюють, так і для подальшого синтезу ефективних алгоритмів управління для виключення негативного впливу збурень на функціонування комплексу і забезпечення гарантованого електропостачання, руху і маневрування судна.

Мета дослідження

Метою даного дослідження є формалізація та розв'язання задачі оптимального керування судовим комбінованим пропульсивним комплексом для забезпечення мінімальних відхилень між заданою та поточною потужностями на гвинті судна при дії збурюючих факторів навколишнього середовища.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для побудови високоефективних алгоритмів керування ПЧ з метою забезпечення сталої частоти обертання ВГ ПЧ в експлуатаційних режимах при дії на КПК збурюючих факторів з боку гвинта та судової електромережі, необхідно враховувати баланс потужностей в електромеханічній системі “Корпус судна – Рушій – Пропульсивна установка – Валогенератор – Суднова електромережа”.

Регулятор частоти обертання ВГ має визначати керуючі впливи, виходячи з поточної швидкості обертання, механічних та електричних потужностях СЕУ. Через те,

що така задача є багатофакторною, розглянемо методи визначення оптимального керування судновими комбінованими пропульсивними комплексами. Керування режимами роботи КПК з ДМ, електродвигуном змінного струму та обертовим перетворювачем частоти можливе за рахунок зміни частоти живлячої напруги генератора опори [5].

При цьому необхідно забезпечувати необхідну механічну та електричну потужності СЕУ. Тому що сумарна потужність енергоустановки судна обмежена, доцільно розглядати баланс механічної потужності в якості критерію оптимізації, а електричної – як обмеження.

Тоді задачу оптимального керування КПК з урахуванням вимог до забезпечення балансу потужностей КПК при роботі в експлуатаційних режимах можна сформулювати наступним чином: необхідно знайти керування, що доставляє мінімум функціонала

$$J = \int_0^t [N_{ВИХ}^*(t) - N_{ВИХ}(t)]^2 \cdot dt, \quad (9)$$

де $N_{ВИХ}^*(t)$ та $N_{ВИХ}(t)$ – задана та діюча механічні потужності на гвинті судна; при обмеженнях:

$$P_{ЕЛ} + P_{КПК} = P_{В.СП}, \quad (10)$$

де $P_{ЕЛ}$ – електрична потужність, що виробляється допоміжною енергетичною установкою судна,

$P_{КПК}$ – електрична потужність, що відбирається від КПК (або відбирається у разі двигунового режиму генератора опори),

$P_{В.СП}$ – необхідна потужність споживачів у відповідному режимі.

Фізичний сенс функціонала мети (9) полягає в тому, що середньоквадратичне відхилення поточної потужності на гвинті від заданої має бути мінімальним. Враховуючи, що потужності на гвинті, ВГ та ГО в КПК з диференціальним механізмом пов'язані співвідношеннями (1-8), зміна потужності, що додається або відбирається від генератора опори, зможе забезпечити виконання зазначеної умови.

При цьому необхідно враховувати запас потужності СЕЕС: у разі “слабкої мережі”, наприклад, режим підсилення КПК стає неможливим.

Таким чином, оптимізація визначеного функціоналу мети, при обмеженнях щодо запасу потужності в електромережі, є задачею слідкування, що зводиться до пошуку варіантів структур матричного перетворювача, при яких забезпечується мінімум спотворень вхідних струмів та виконуються умови щодо вихідних напруг [6].

Структуру автономної ЕС із МП, що може реалізовувати такий закон керування, наведено на рис. 2.

Стабілізація частоти обертання валогенератора ВГ здійснюється за рахунок керування частотою обертання генератора опори ГО. При цьому параметри налаштувань регулятора Р (у випадку ПІ-закону регулювання це, відповідно, пропорційна k_p та інтегральна k_i складові) визначаються блоком оптимізації БО на основі аналізу відхилень потужностей згідно (9) та (10).

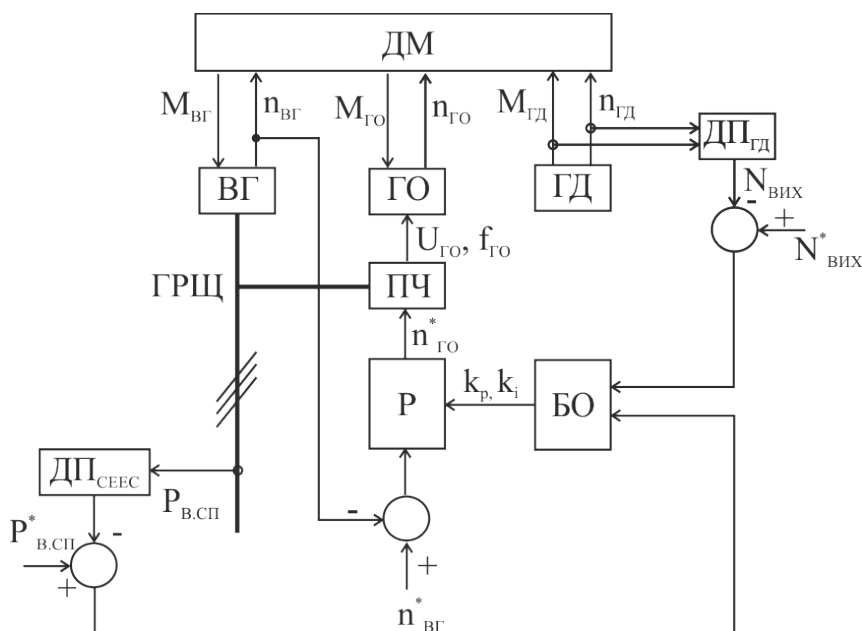


Рис. 2. Структура КПК з оптимальним регулятором:
 ГД – головний двигун, ВГ – валогенератор, ГО – генератор опори, ДМ – диференціальний механізм, ГРЩ – головний розподільний щит, ПЧ – перетворювач частоти, Р – регулятор, БО – блок оптимізації, ДП – датчик потужності

Регулятор формує сигнал керування перетворювачем частоти ПЧ, який забезпечує певний режим роботи генератора опори.

Таким чином, виконується стабілізація параметрів напруги бортової електромережі при зміні частоти обертання головного двигуна ГД. При цьому забезпечується необхідна потужність на рушійному гвинті КПК та контролюється стан суднової електромережі для уникнення перевантажень, на основі чого обирається та чи інша конфігурація КПК.

Через те, що кількість варіантів конфігурації КПК обмежена, для оптимізації доцільно застосувати безперервне динамічне програмування, як розв'язання задач кібернетики, що зводяться до проблеми оптимального перебору [7].

Функціонал мети (9) можна представити у вигляді:

$$J = \int_0^t [N_{ВИХ}^*(t) - \omega_{ВИХ}(t) \cdot M_{ВИХ}^*(t)]^2 \cdot dt. \quad (11)$$

У випадку КПК з ДМ, враховуючи вирази для моментів (2.3) та швидкостей (2.2), можна отримати вираз для функціоналу мети, що містить швидкості та моменти ВГ та ГО:

$$J = \int_0^t \left[N_{ВИХ}^* - \frac{(\omega_{СГ} + i_2 \cdot \omega_{ГО})}{i_1} \cdot \frac{M_{ГО}}{i_2} \right]^2 \cdot dt, \quad (12)$$

або

$$J = \int_0^t \left[N_{ВИХ}^* - \left(\frac{\omega_{СГ}}{i_1} + \omega_{ГО} \right) \cdot M_{ГО} \right]^2 \cdot dt. \quad (13)$$

В отриманому виразі швидкості ГО та ВГ та момент $M_{ГО}$ пов'язані один з одним через співвідношення (1).

За методом Беллмана поверхні розв'язків формуються як [8]

$$S(a, c) = \min_u J, \quad (14)$$

де $-\infty < a < c$; $-\infty < c < \infty$. У силу адитивності інтеграла можемо написати

$$S(a, c) = \min_{y[a, a+\Delta]} \left[\int_a^{a+\Delta} F(\omega_{ГО}, \omega_{СГ}, M_{ГО}, t) dt + S(a + \Delta, c_1) \right], \quad (15)$$

де мінімізація проводиться по всім $\omega_{ГО}$, визначеним на проміжку зміни $x \in [a, a+\Delta]$, причому

$$y(a) = c, y(a+\Delta) = c_1. \quad (16)$$

Звідси отримуємо:

$$S(a, c) = \min_{\int (U_{aux}(t) - U_{aux}^*(t))^2 dt \leq \varepsilon} \left[\int_a^{a+\Delta} \left[N_{ВНХ}^* - \left(\frac{\omega_{СГ}}{i_1} + \omega_{ГО} \right) \cdot M_{ГО} \right]^2 dt + S(a + \Delta, c_1) \right]. \quad (17)$$

Розв'язання рівняння (17) має вигляд поверхонь розв'язків [7]. Оптимальний рух системи в просторі станів здійснюється по перетину цих поверхонь розв'язків, що відповідає ковзному режиму.

На основі вищезазначених міркувань можна сформулювати алгоритм оптимального керування КПК з вибором режиму та мінімізацією відхилень потужності на гвинті, суть якого полягає у наступному: за виразами (9) та (10) визначається відхилення механічної потужності, аналізується можливість реалізації режиму підсилення на основі інформації про поточний рівень споживання електроенергії та обирається відповідний режим роботи КПК з ДМ з параметрами налаштувань регулятора ГО згідно розробленої моделі нечіткого виводу.

Враховуючи випадковий характер навантажень, як з боку електричної енергосистеми, так і безпосередньо рухової установки, що ускладнює реалізацію представленого алгоритму оптимального управління в реальному часі, перспективним підходом є застосування техніки нечіткої логіки для побудови оптимального регулятора генератора опори суднового комбінованого пропульсивного комплексу [9].

Висновки

1. Розглянуто методи визначення оптимального керування судновим КПК з ДМ, електродвигуном змінного струму та обертовим перетворювачем частоти за рахунок зміни частоти живлячої напруги генератора опори.

2. З урахуванням вимог до забезпечення балансу потужностей КПК при роботі в експлуатаційних режимах було сформульовано задачу оптимального керування за мінімумом відхилення між заданою та діючою механічними потужностями на гвинті судна; при обмеженнях щодо електричної потужності в судновій електромережі.

3. Для реалізації оптимального регулятора генератора опори доцільно застосовувати методи нечіткої логіки.

Список використаної літератури

1. Григорьев А.В., Петухов В.А. Современные и перспективные судовые валогенераторные установки. СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2009. 176 с.
2. Будашко В.В. Розробка трирівневої багатокритеріальної стратегії управління гібридною судновою енергетичною установкою комбінованого пропульсивного комплексу. *Електротехніка і електромеханіка*. 2017. № 2. С. 62-72.
3. Ищенко И.М., Вороненко С.В., Данык В.В. Математическая модель дифференциального синхронного привод-генераторного агрегата. *Научный вестник Херсонской государственной морской академии: научный журнал*. 2015. № 2 (13). С. 209-215.
4. Lebedenko Yu.O., Danyk V.V., Krupitsa P.O. Adaptive Control of the Combined Propulsion System. *2016 IEEE 4th International Conference Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC): Proceedings, Kyiv, October 18-20*. 2016. P. 214-217. DOI: 10.1109/MSNMC.2016.7783145.
5. Іщенко І.М., Даник В.В., Лебеденко Ю.О. Оптимізація процесів керування судновими комбінованими пропульсивними комплексами. *FS-2019: матеріали міжнар. наук.-практ. конф., присвяченої пам'яті професорів Фомина Ю.Я. і Семенова В.С., м. Одеса – м. Стамбул – м. Одеса, 24-28 квіт. 2019*. Одеса. 2019. С. 225-227.
6. Михайлов В.С. Теория управления. Киев: Выща Школа, 1988. 312 с.
7. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 464с.
8. Беллман Р. Динамическое программирование. М., Изд. иностр. лит., 1960. 400 с.
9. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. К.: Радиоаматор. 2008. 972 с.

References

1. Grigorev, A.V., & Petuhov, V.A. (2009). Sovremennyye i perspektivnyie sudovyye valogeneratornyie ustanovki. SPb.: Izd-vo GMA im. adm. S.O. Makarova.
2. Budashko, V.V. (2017). Rozrobka tryrivnevoi bahatokryterialnoi stratehii upravlinnia hibrydnoiu sudnoviu enerhetychnoiu ustanovkoiu kombinovanoho propul'syvnoho kompleksu. *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. **2**, 62-72.
3. Ischenko, I.M., Voronenko, S.V., & Danyik, V.V. (2015). Matematicheskaya model differentsialnogo sinhronnogo privod-generatornogo agregata. *Naukoviy Visnik Hersonskoyi Derzhavnoyi Morskoyi Akademiyi: naukoviy zhurnal*. **13**, 209-215.
4. Lebedenko, Yu.O., Danyk, V.V., & Krupitsa, P.O. (2016). Adaptive Control of the Combined Propulsion System. *2016 IEEE 4th International Conference Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC): Proceedings, Kyiv, October 18-20*. 214-217.
5. Ishchenko, I.M., Danyk, V.V., & Lebedenko, Yu.O. (2019). Optyimizatsiia protsesiv keruvannya sudnovymy kombinovanyu propul'syvnyu kompleksamy. *FS-2019: materialy mizhnar. nauk.-prakt. konf., prysviachenoi pamiati profesoriv Fomina Yu.Ia. i Semenova V.S., m. Odesa – m. Stambul – m. Odesa*. 225-227.
6. Mihaylov, V.S. (1988). Teoriya upravleniya. Kiev: Vyischa Shkola.
7. Kim, D.P. (2004). Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T.2. Mnogomernyye, nelineynyye, optimalnyie i adaptivnyie sistemyi: ucheb. posobie. Moskva: FIZMATLIT.
8. Bellman, R. (1960). Dinamicheskoe programmirovaniye. M., Izd. inostr. lit.
9. Gostev, V.I. (2008). Nechetkie regulatoryi v sistemah avtomaticheskogo upravleniya. K.: Radioamator.

Даник Вадим Вікторович – старший викладач кафедри управління судном, Херсонська державна морська академія, e-mail: vadymdanyk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4439-0309.

Колебанов Олександр Костянтинович – к.т.н., доцент, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики, Херсонська державна морська академія, e-mail: kolebanovkak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9618-9105.

Лебеденко Юрій Олександрович – к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматизації, робототехніки та мехатроніки, Херсонський національний технічний університет, e-mail: lebedenko@kntu.net.ua, ORCID: 0000-0002-1352-9240.