

Голубєва С.М., Бойко С.О.

МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ГРЕБНОЮ ДИЗЕЛЬ-ЕЛЕКТРИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ

В статті розроблено метод оптимального управління гребною дизель-електричною установкою, який, на відміну від існуючих, містить вплив на магнітні потоки уніполярних машин та подачу палива до теплового двигуна для підвищення енергетичної ефективності. Проведено синтез оптимальних регуляторів і математичне імітаційне моделювання. Обчислення проводилося паралельно за двома системами. Перша, система з класичним (роздільним) управлінням гребною дизель-електричною установкою з уніполярними машинами, коли управління виробляється за однією змінною, а інші змінні контурів підтримуються на номінальних значеннях. Друга система, з оптимальним управлінням за критерієм мінімуму втрат енергії в каналі її перетворення від двигуна до рушія (гвинта), коли всі змінні управління підтримуються на оптимальному рівні, а перехід від одного оптимального стану до іншого відбувається за оптимальними динамічними характеристиками. Доведено, побудова системи управління гребною дизель-електричною установкою дозволяє отримати ефект, що полягає у мінімізації витрат енергії, що відповідає меті статті. Проведено синтез оптимальних регуляторів і математичне імітаційне моделювання. Обчислення проводилося паралельно за двома системами. Перша система, з класичним (роздільним) управлінням ГДЕУ з уніполярними машинами, коли управління виробляється за однією змінною, а інші змінні контурів підтримуються на номінальних значеннях. Друга система, з оптимальним управлінням за критерієм мінімуму втрат енергії в каналі її перетворення від двигуна до рушія (гвинта), коли всі змінні управління підтримуються на оптимальному рівні, а перехід від одного оптимального стану до іншого відбувається за оптимальними динамічними характеристиками.

Ключові слова: енергоефективність, оптимальне управління, морський транспорт, напівпровідникові прилади, силова електроніка, суднові двигуни, суднова електроенергетична установка, енергетична установка, судно, діагностування, ефективна потужність, передача потужності, судовий дизель, асинхронний двигун, гребний електродвигун, гребна електрична установка, виявлення несправностей. валопровід, діагностика ротора, моніторинг обладнання.

Постановка проблеми. Підвищити енергетичну ефективність гребною дизель-електричною установкою (ГДЕУ) можна за рахунок оптимального управління процесом передачі енергії від дизеля до гвинта. У даній статті наведено постановку задачі оптимального управління гребною дизель-електричною установкою за критерієм втрат енергії. Для розв'язання задачі оптимального управління будується математична модель управляемого об'єкту або процесу, що описує його поведінку з часом під впливом управляючих впливів та власного поточного стану. Математична модель допускає визначення диференціальних (або різницевих) рівнянь, що описують можливі способи руху об'єкта управління в залежності від стану та параметрів управління та визначення обмежень на використанні ресурси у вигляді рівнянь або нерівностей:

Оптимальне управління – це задача проєктування системи, яка забезпечує для заданого об'єкту управління або процесу такий закон управління або управляючу послідовність впливів, що забезпечує максимум або мінімум функціоналу якості системи [1].

Найбільше широко при проєктуванні систем управління застосовуються такі методи: варіаційне обчислення, принцип максимуму Понтрягіна та динамічне програмування Белмана [1]. Розв'язання задачі оптимального управління в такій постановці для ГДЕУ є проблематичним за такими умовами:

- а) відсутність аналітичного розв'язання задачі для нелінійних систем;
- б) розв'язання задачі навіть для лінійних систем може бути отримане чисельними методами й тільки для квадратичного критерію якості;
- в) непрозорість критерію якості;
- г) складність розв'язання лінійної задачі при квадратичному критерії якості, що вимагає застосування чисельних методів.

Таким чином, необхідно розробити метод оптимального управління ГДЕУ за критерієм мінімізації втрат.

Аналіз останніх досліджень. Технологія передачі енергії від теплового двигуна до рушія містить у собі вироблення електроенергії, її перетворення та узгодження руху електродвигуна і рушія. На теперішній час найбільше поширення отримала така структура передачі енергії: «тепловий двигун» – «електричний генератор» – «електричний перетворювач» – «гребний електродвигун» – «(редуктор)» – «гвинт». Дана структура дозволяє синтезувати саме ЄСЕЕС. Реалізація даної структури стала можлива завдяки значному технічному прогресу в області силовій електроніки.

Серед основних робіт у даній області слід відмітити вітчизняних вчених Вишневського Л.В., Муху М.Й., Савенко О.Є., Піпченко А.М.

Мета статті: розроблення методу оптимального управління ГДЕУ за критерієм мінімізації втрат енергії.

Основна частина. *Синтез оптимальних регуляторів змінних станів при управлінні моментом двигуна.*

Створення електромагнітного моменту двигуном є цільовим призначенням ГДЕУ. Його величина визначається, виходячи з умов експлуатації, і задається оператором або системою управління більш високого рівня. Задане значення моменту зв'язує змінні стани співвідношенням [4]:

$$M^* = \psi_{34}^* \cdot i_4^* = L_{34}^* \cdot i_4^* \cdot i_2^*, \quad (1)$$

де $\psi_{34}^* = L_{34}^* \cdot i_4^* \in [0,1]$ – потокозчеплення обмотки збудження з обмоткою якоря; i_4^* – струм обмотки збудження.

Передача енергії від дизеля до гвинта з метою створення електромагнітного моменту вирішується неоднозначно. Одне і те саме значення електромагнітного моменту двигуна може бути отримане при різних сполученнях змінних стану ГДЕУ. Ці значення визначаються так, щоб мінімізувати критерій управління – втрати в елементах, що керують передачею енергії від дизеля до гвинта.

Екстремум критерію знаходиться на області змінних станів системи управління. При цьому змінні стани пов'язані між собою заданим електромагнітним моментом (1). При пошуку екстремуму використовуються зв'язки між змінними стану, визначені рівняннями, що описують динаміку системи.

Залежності втрати потужності від струму ланцюга якорів i_2^* при різних значеннях швидкості обертання якоря генератора ω_0^* , та швидкості обертання якоря двигуна ω^* , наведені на рис. 1 а) та б).

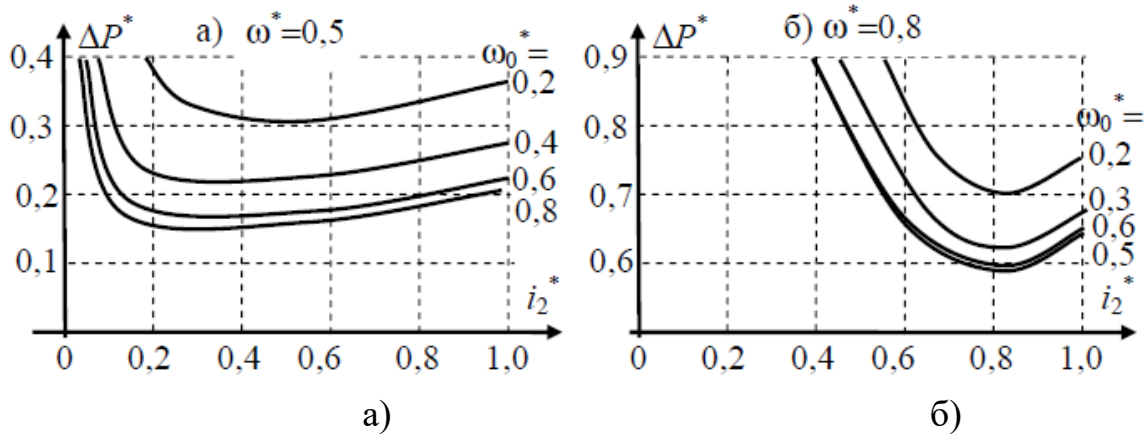


Рисунок 1 – Залежності втрат потужності від струму якорів при різних значеннях швидкості обертання якоря генератора і при швидкості обертання якоря двигуна:
а) $\omega^* = 0,5$; б) $\omega^* = 0,8$.

Екстремальні значення $i_{2\text{опт}}^*$, $\omega_{0\text{опт}}^*$ залежать від параметрів системи та від швидкості обертання валу двигуна й заданого значення моменту на валу двигуна. Якщо покласти, що в статичному режимі момент сили на валу двигуна пов'язаний зі швидкістю обертання залежністю:

$$M^* = k_x \cdot M_H^* \cdot \omega^{*2} \cdot \text{sign}(\omega^*), \quad (2)$$

то екстремальні значення $i_{2\text{опт}}^*$ та $\omega_{0\text{опт}}^*$ будуть представлені функціями швидкості ω^* , які наведені на рис. 2.

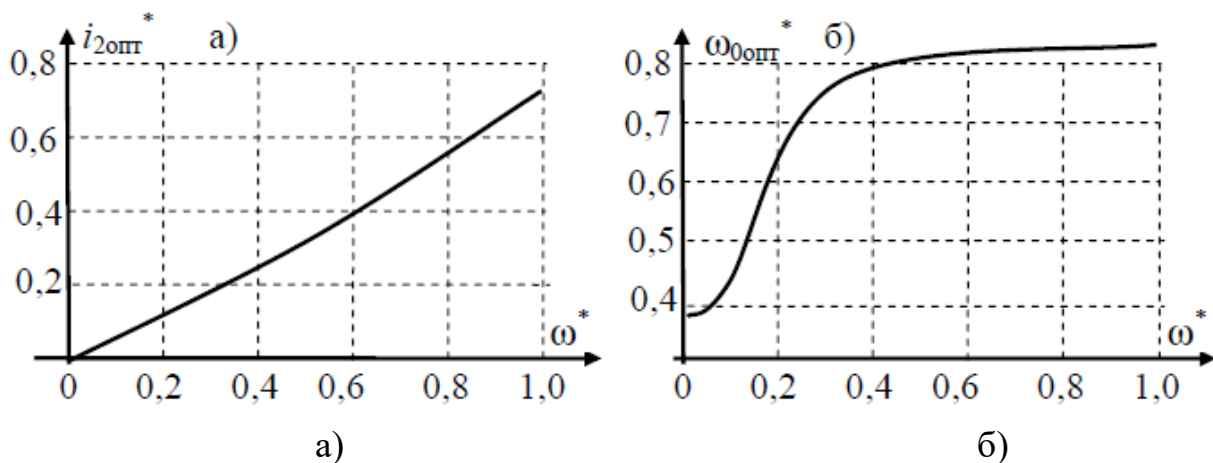


Рисунок 2 – Залежності оптимальних значень змінних стану від швидкості обертання якоря двигуна: а) струму якорів; б) швидкості обертання генератора

Якщо продиференціювати функцію критерію за змінними стану $i_{2\text{опт}}^*$ та $\omega_{0\text{опт}}^*$ та прирівняти ці похідні до нуля, то одержимо рівняння, розв'язання якого визначить $i_{2\text{опт}}^*$ та $\omega_{0\text{опт}}^*$.

Знайти точне аналітичне розв'язання цих рівнянь відносно i_2^* та ω^* не представляється можливим, тобто знайти екстремальні значення $i_{2\text{опт}}^*$, $\omega_{0\text{опт}}^*$ функції можна лише чисельними методами. Однак помітимо, що величина приведенного значення падіння напруги на вентиліях перетворювача мала ΔU^* . Тому покладемо $\Delta U^* = 0$. У цьому випадку розв'язання рівняння:

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial i_2^*} = 0$$

дає значення струму якорем машин:

$$i_{2opt}^* = \sqrt{M^*} \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{R_1^* \cdot L_{34}^{*2} \cdot \omega^{*2} + R_4^* \cdot L_{12}^{*2} \cdot \omega_0^{*2}}{R_2^* \cdot L_{34}^{*2} \cdot (R_1^* \cdot R_2^* + L_{12}^{*2} \cdot \omega_0^{*2})} \right)}. \quad (3)$$

Якщо врахувати, що:

$$R_1^* \cdot R_2^* + L_{12}^{*2} \omega_0^{*2} \approx L_{12}^{*2} \cdot \omega_0^{*2}, \quad (4)$$

то формула (2) прийме вигляд:

$$i_{2opt}^* = \sqrt{M^*} \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{R_1^* \cdot \omega^{*2}}{R_2^* \cdot L_{12}^{*2} \cdot \omega_0^{*2}} + \frac{R_4^*}{R_2^* \cdot L_{34}^{*2}} \right)}. \quad (5)$$

Формула (5) визначає оптимальне значення струму якорів електричних машин при заданому значенні електромагнітного моменту. Ґрунтуючись на формулі (5), синтезуємо оптимальний регулятор струму якорів електричних машин, що є складовим методу оптимального управління:

$$\Delta y_2 = \sqrt{M^*} \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{R_1^* \cdot \omega^{*2}}{R_2^* \cdot L_{12}^{*2} \cdot \omega_0^{*2}} + \frac{R_4^*}{R_2^* \cdot L_{34}^{*2}} \right)} - i_2^*. \quad (6)$$

Значення i_2^* , ω_0^* та ω^* в формулі (5) підставляються з відповідних датчиків. Якщо динамічні процеси в контурі струму синтезовані так, що регулятор забезпечує нульову статичну помилку, то в статичному режимі $\Delta y_2 = 0$ та $i_2^* = i_{2opt}^*$. Фрагмент структурної схеми з оптимальним регулятором струму наведений на рис. 3.

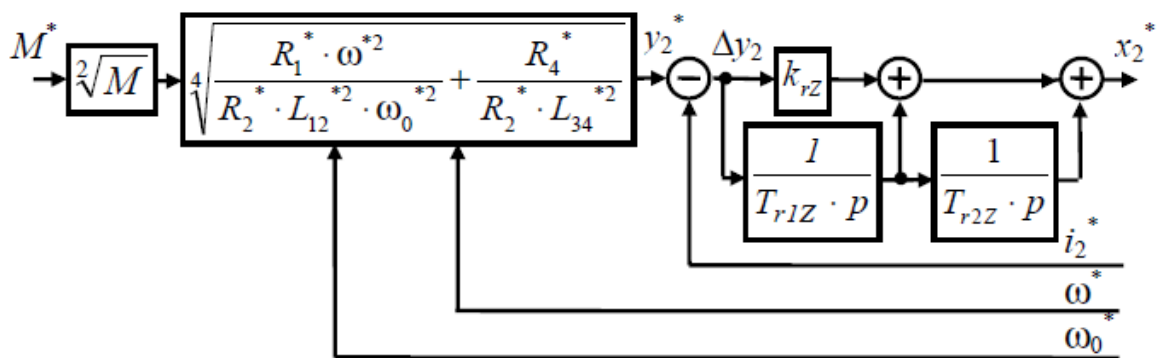


Рисунок 3 – Фрагмент структурної схеми з оптимальним регулятором струму ланцюга якорів уніполярних електричних машин

Фрагмент структурної схеми з оптимальним регулятором струму збудження двигуна приведений на рис. 4.

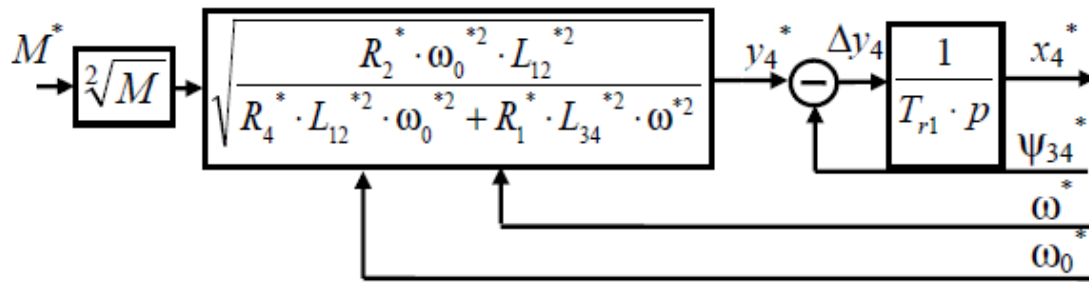


Рисунок 4 – Фрагмент структурної схеми з оптимальним регулятором струму збудження уніполярного двигуна

Графік залежності оптимальної швидкості обертання махових мас якоря генератора від швидкості обертання махових мас якоря двигуна наведений на рис. 5.

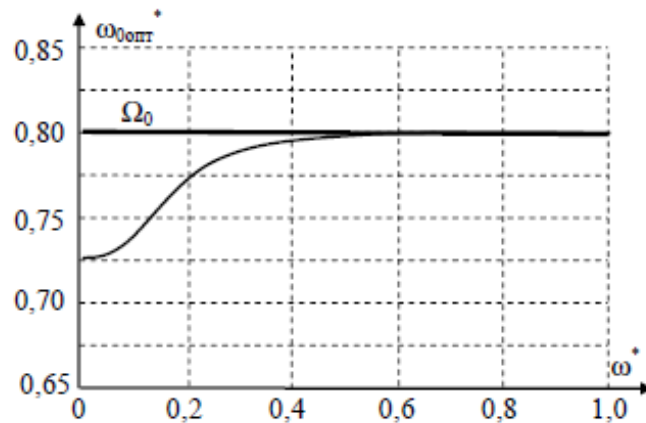


Рисунок 5 – Графік залежності оптимальної швидкості обертання махових мас якоря генератора від швидкості обертання махових мас якоря двигуна

Аналіз залежності, наведеної на рис. 5, свідчить, що з достатньою для практичних цілей точністю можна вважати, що $\omega_{\text{опт}}^* \approx \Omega_0$. Таким чином, оптимальний регулятор повинен підтримувати сталість швидкості обертання махових мас якоря генератора.

Синтез оптимальних регуляторів змінних станів при управлінні швидкістю обертання якоря двигуна.

Розробимо оптимальні за критерієм втрат енергії управляючі впливи на ГДЕУ при фіксованому значенні швидкості обертання якоря двигуна. У даній постановці цільова функція гребної установки найбільш поширена, оскільки між швидкістю обертання гвинта та швидкістю руху судна має зв'язок близький до лінійного. Його швидкість визначається, виходячи з умов експлуатації, і задається оператором або системою управління більш високого рівня.

У статті вже розкрито сутність синтезу динамічних процесів при керуванні швидкістю обертання гвинта шляхом впливу на контур струму ланцюга якорів електричних машин.

Цей контур швидкості визначив змінну стану i_2^* . При цьому залишаються не заданими вхідні впливи на контури струму обмотки збудження двигуна і контур швидкості обертання махових мас дизель-генератора. Сформуємо оптимальне управління струмом обмотки збудження двигуна та швидкістю обертання махових мас дизель-генератора при заданому значенні швидкості обертання гвинта. Оскільки струм ланцюга якорів машин заданий керуючим впливом, то варто сформувати оптимальні керуючі впливи на контур струму збудження двигуна й контур швидкості обертання махових мас дизеля.

Сформуємо оптимальний регулятор для струму збудження двигуна за керуючою змінною y_4^* . Критерій оптимальності визначений:

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot p i_1 ; \quad (7)$$

$$u_2 = R_2 \cdot i_2 + L_2 \cdot p i_2 + L_{21} \cdot \omega \cdot i_1 ,$$

де R_1 – опір обмотки збудження; L_1 – індуктивність обмотки збудження; i_1 – струм обмотки збудження; R_2 – опір обмотки якоря; L_2 – індуктивність розсіювання обмотки якоря; i_2 – струм обмотки якоря; L_{21} – взаємна індуктивність обмоток якоря та збудження; ω – швидкість обертання якоря.

Мінімум критерію досягається при виконанні рівності (5). Відмітимо, що струми y_2^* , y_4^* та момент M^* пов'язані співвідношенням. Підставимо значення моменту M^* в формулу (6) та знайдемо струм i_4^* :

$$i_{2opt}^* = i_{2opt}^* \sqrt{\left(\frac{R_2^* \cdot \omega_0^{*2} \cdot L_{12}^{*2}}{R_4^* \cdot L_{12}^{*2} \cdot \omega_0^{*2} + R_1^* \cdot L_{34}^{*2} \omega^{*2}} \right)}. \quad (8)$$

Значення i_2^* , ω_0^* та ω^* у (8) підставляються з відповідних датчиків, значення $i_{2opt}^* = y_2^*$ є задаючим впливом на контур струму якорів електричних машин. Оптимальне управління контуром швидкості обертання махових мас дизель-генератора здійснюється аналогічно при управлінні швидкістю обертання гвинта.

Структурна схема системи оптимального управління ГДЕУ при керуванні швидкістю гвинта наведена на рис. 6.

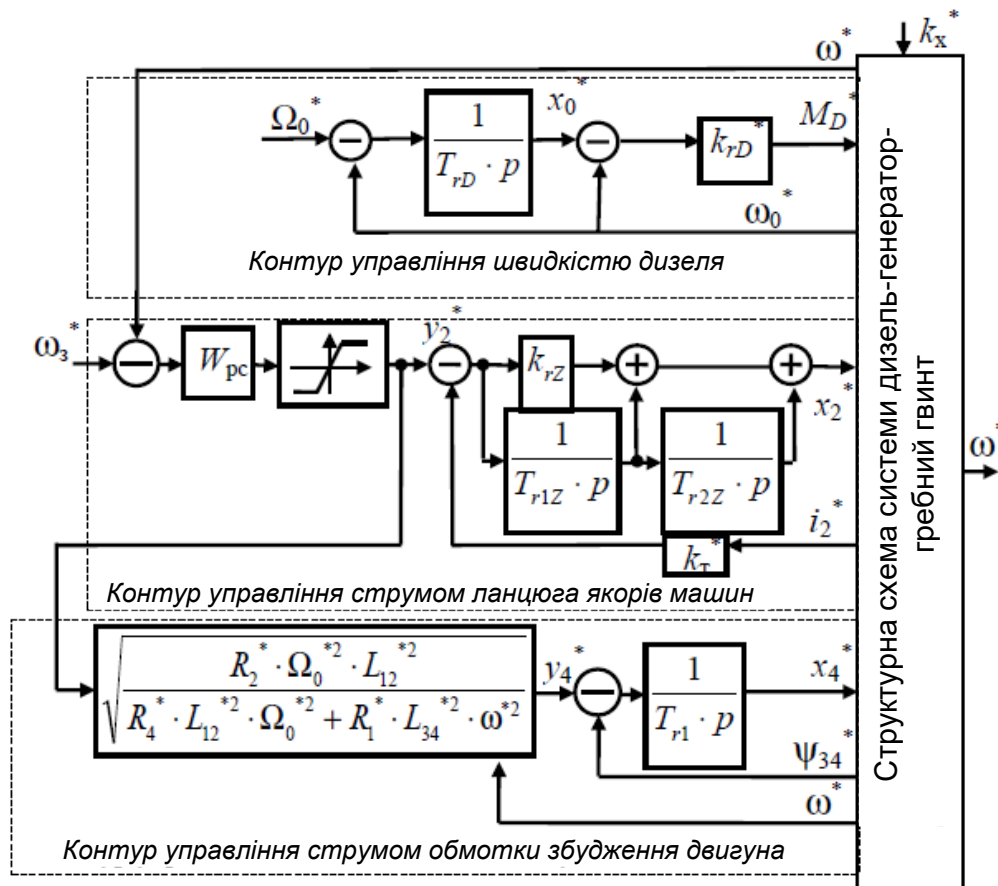


Рисунок 6 – Структурна схема системи оптимального управління гребною дизель-електричною установкою при задаванні швидкості гвинта

Таким чином, отримано систему оптимального управління ГЕУ шляхом впливу на магнітні потоки уніполярних машин та подачу палива до теплового двигуна.

Порівняємо режим оптимального управління з найбільше розповсюдженим режимом, коли

магнітний потік у машинах та швидкість дизеля підтримують постійним: $\psi_{12}^* = \psi_{34}^* = 1$, $\omega_0^* = 1$ класичний режим роздільного управління.

Для цього побудована модель ГДЕУ з уніполярними машинами і системи управління з використанням технології комп'ютерного моделювання динамічних систем на базі програми Simulink, що є додатком математичного пакета MATLAB [9].

Моделювання режимів роботи ГДЕУ здійснюється в часовій області у абсолютних значеннях (секунди), всі інші параметри задані у відносних одиницях. При русі судна у вільній воді звичайно використовуються два технологічних режими роботи гребної установки: режими економічного ходу та повного ходу. Режим повного ходу судна з повною (крейсерською) швидкістю використовується не часто, а основним технологічним режимом роботи ГДЕУ є режим економічного ходу, при цьому швидкості обертання вала гребного електродвигуна лежать у діапазоні від 50 до 80% від номінальної швидкості.

При моделюванні в середовищі MATLAB був створений файл параметризації, що задає значення і залежності параметрів гребної дизель-електричної установки й системи управління.

Моделювання процесів проводилося паралельно по двох моделях з однаковим задаючим впливом (рис. 7).

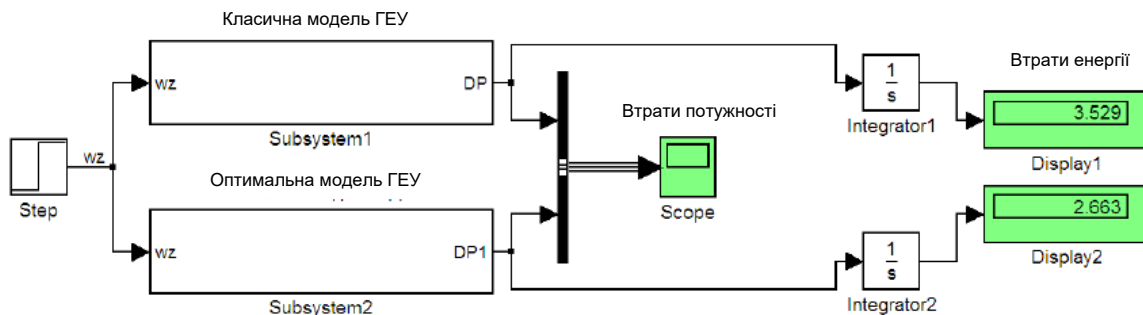


Рисунок 7 – Загальна схема систем для моделювання пуску гребної дизель-електричної установки в класичному (роздільному) і оптимальному режимі роботи

Були побудовані структурна схема класичного роздільного управління ГДЕУ з уніполярними машинами (рис. 8), при підтримці швидкості обертання дизеля ω_0^* та струмом обмеження ГЕД i_4^* на номінальному рівні, а також схема оптимального управління при підтримці швидкості обертання дизеля та струму намагнічування ГЕД на оптимальних значеннях (рис. 9).

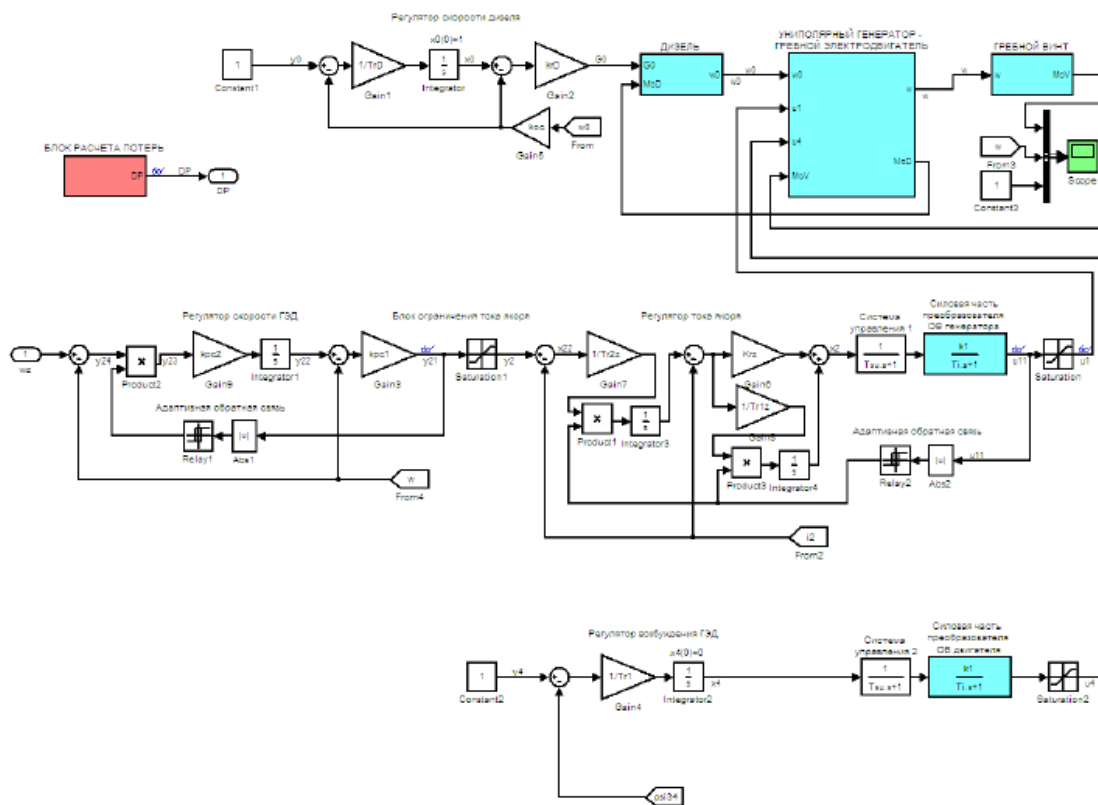


Рисунок 8 – Структурна схема класичного (роздільного) управління гребною дизель-електричною установкою з уніполярними машинами

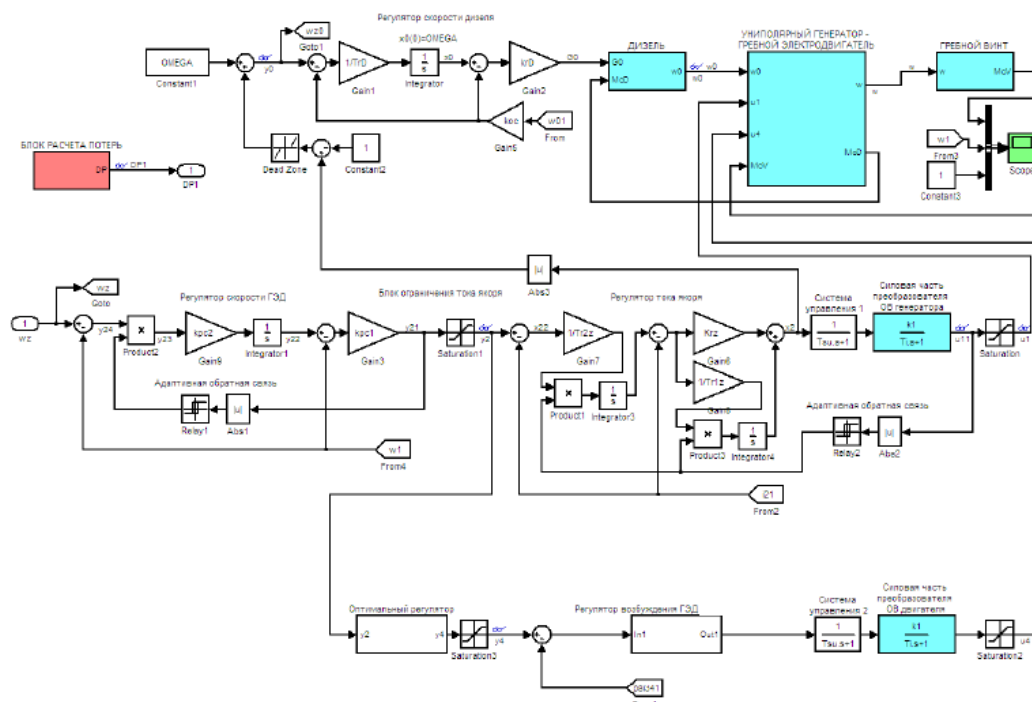


Рисунок 9 – Структурна схема оптимального управління гребною дизель-електричною установкою з уніполярними машинами

Основні елементи системи представлені у вигляді блоків, моделі яких були розглянуті вище. Так, блок структурної схеми моделі системи уніполярний генератор – гребний електродвигун наведений на рис. 10.

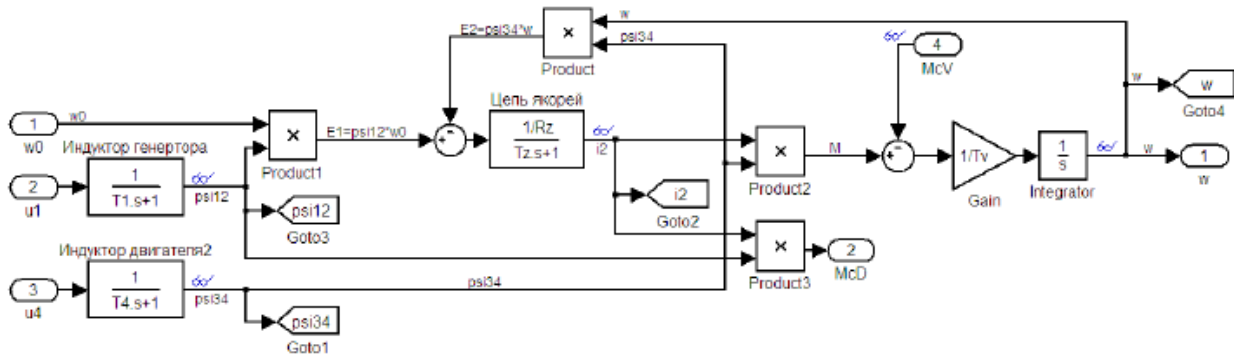


Рисунок 10 – Блок структурної схеми моделі системи «уніполярний генератор - гребний електродвигун»

При аналізі проводилося порівняння основних критеріїв управління (сумарні втрати енергії і потужності) і поведінка цільової функції управління (момент на валу та швидкість гвинта). Отримано перехідні характеристики змінних станів при різному значенні задаючого впливу. Усі змінні стани наведені у відносному вигляді.

Відповідно до представлених результатів, можна зробити висновок про ефективність оптимального управління гребною дизель-електричною установкою з уніполярними машинами.

При цьому в режимі оптимального управління без обмеження змінні стани системи, на малих швидкостях обертання гвинта, спостерігаються менші втрати енергії як у динамічному, так і в статичному (сталому) режимах.

При пуску до швидкості $\omega=0,8$ у динаміці спостерігається короткочасний режим, коли втрати при оптимальному управлінні порівнюється з втратами при класичному управлінні. Це пояснюється перебуванням змінних станів в зоні обмеження та динамічних помилок управління. Розглянемо залежності втрат від швидкості обертання гвинта в сталому режимі для класичного та оптимального управління при роботі гвинта у вільній воді та у швартовому режимі (рис. 11).

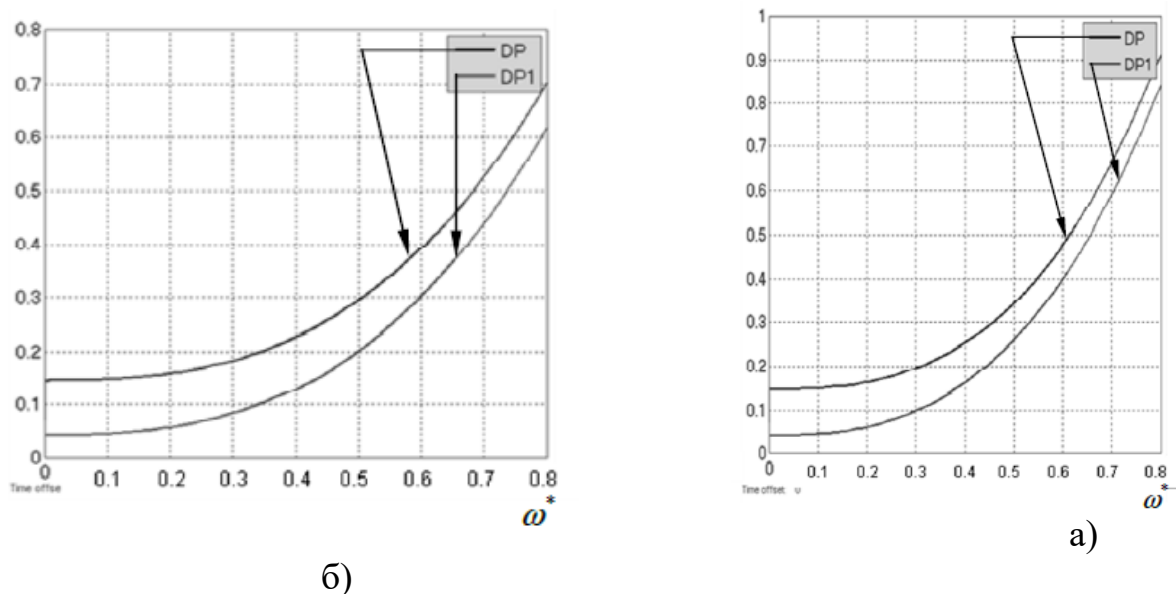


Рисунок 11 – Залежність втрат від швидкості обертання гвинта в сталому режимі:
а) робота гвинта у вільній воді; б) робота гвинта у швартовому режимі
DP – втрати при роздільному управлінні; DP1 – втрати при оптимальному управлінні

У цілому, у сталих і динамічних режимах при заданій швидкості обертання гвинта ω менш номінальної система оптимального управління підтримує втрати енергії в ГДЕУ з уніполярними

машинами на мінімальному рівні. При збільшенні швидкості обертання гвинта втрати квадратично збільшуються та у номінальному режимі швидкості обертання наближаються до 1. При цьому ефективність оптимального управління зберігається у всьому діапазоні регулювання і складає від 5 до 13%, що і відображає економію енергії.

Висновки. Проведено синтез оптимальних регуляторів і математичне імітаційне моделювання. Обчислення проводилося паралельно за двома системами. Перша система, з класичним (роздільним) управлінням ГДЕУ з уніполярними машинами, коли управління виробляється за однією змінною, а інші змінні контурів підтримуються на номінальних значеннях. Друга система, з оптимальним управлінням за критерієм мінімуму втрат енергії в каналі її перетворення від двигуна до рушія (гвинта), коли всі змінні управління підтримуються на оптимальному рівні, а перехід від одного оптимального стану до іншого відбувається за оптимальними динамічними характеристиками.

Таким чином, можна зробити узагальнюючий висновок, що побудова системи управління ГДЕУ, дозволяє отримати ефект, що полягає у мінімізації витрат енергії, що відповідає меті статті.

Golubieva S.

METHOD OF OPTIMAL CONTROL OF A PROPULSION DIESEL-ELECTRIC INSTALLATION

The article develops a method for optimal control of a diesel-electric propulsion unit, which, unlike existing ones, includes an effect on the magnetic fluxes of unipolar machines and fuel supply to the heat engine to increase energy efficiency. The synthesis of optimal controllers and mathematical simulation modeling were carried out. The calculation was carried out in parallel for two systems. The first is a system with classical (separate) control of a diesel-electric propulsion unit with unipolar machines, when control is performed by one variable, and other circuit variables are maintained at nominal values. The second system is with optimal control based on the criterion of minimum energy losses in the channel of its conversion from the engine to the propeller (propeller), when all control variables are maintained at an optimal level, and the transition from one optimal state to another occurs according to optimal dynamic characteristics. It is proven that the construction of a diesel-electric propulsion unit control system allows to obtain the effect of minimizing energy consumption, which corresponds to the purpose of the article. The synthesis of optimal controllers and mathematical simulation modeling were carried out. The calculation was carried out in parallel for two systems. The first system, with classical (separate) control of the GDEU with unipolar machines, when control is performed by one variable, and other circuit variables are maintained at nominal values. The second system, with optimal control by the criterion of minimum energy losses in the channel of its conversion from the engine to the propeller (propeller), when all control variables are maintained at the optimal level, and the transition from one optimal state to another occurs according to optimal dynamic characteristics.

Keywords: energy efficiency, optimal control, marine transport, semiconductor devices, power electronics, ship engines, ship electrical power plant, power plant, ship, diagnostics, effective power, power transmission, ship diesel, asynchronous engine, propeller electric motor, propeller electric plant, fault detection. shaft drive, rotor diagnostics, equipment monitoring

ЛІТЕРАТУРА

1. Ершова Н. М. Современные методы теории проектирования и управления сложными динамическими системами: Монография. Дніпро : ПГАСА, 2016. 282 с.
2. Судовые электрические машины постоянного тока / В. Н. Васильев, Ю. В. Пащенко. – Одеса : Банто, 2000. - 100 с.
3. Расчет параметров автоколебаний в системе стабилизации скорости вращения судового генератора [Електронний ресурс] / Л. В. Вишневский, А. М. Веретенник // Електромашинобуд. та

електрообладн. - 2005. - Вип. 64. - С. 28-32.

4. Системы автоматического регулирования напряжения синхронных генераторов : монография / К. Г. Коноплев, С. А. Конева. – Севастополь : Севастоп. нац. техн. ун-т, 2007. – 87 с.
5. Судовые электрические машины : науч.-метод. пособие / А. М. Олейников, В. Н. Мартынов. - Севастополь : Изд-во СевНТУ, 2010. - 316 с.
6. Электрооборудование, электронная аппаратура и системы управления / А. Н. Пипченко, В. В. Пономаренко, Ю. И. Теплов, В. А. Шевченко; Ин-т последиплом. образования "Одес. мор. тренажер. центр". - 4-е изд., перераб. и доп. - Одеса : ТЭС, 2012. - 487 с.
7. Оптимізація роботи багатогенераторної суднової електроенергетичної системи / О.Є. Савенко // Вісн. Вінниц. політехн. ін-ту. - 2012. - № 1. - С. 131-134.
8. Оптимізація роботи суднової електростанції з метою підвищення якості електроенергії / О. Є. Савенко // Вісн. Вінниц. політехн. ін-ту. - 2013. - № 6. - С. 74-78.
9. Моделирование динамических процессов в автономной электроэнергетической системе при асинхронном режиме работы одного из синхронных генераторов / И. М. Гвоздева, В. В. Демиров // Систем. технології. - 2015. - № 3. - С. 10-20.
10. Лозинський А., Мороз В., Паранчук Я. Розв'язування задач електромеханіки в середовищі пакетів MathCAD і MATLAB: навч. Посібник. – Львів: Видавництво Державного університету «Львівська політехніка», 2000 – 166 с.
11. Особливості визначення потужності допоміжно-аварійного електроприводу руху судна з комбінованою дизель-електричною силовою установкою / О. М. Рак, В. В. Бушер, О. В. Глазева // Електромех. і енергозберігаючі системи. - 2020. - № 4. - С. 8-16.
12. Vijay K. G. Power Factor Improvement of Induction Motor by Using Capacitors [Електронний ресурс] / K. G. Vijay // International Journal of Engineering Trends 330 and Technology. – 2013..

REFERENCES

1. Ershova N. M. Sovremennye metody teoryy proektyrovaniya y upravleniya slozhnymy dynamycheskymy systemamy: Monohrafiya. Dnipro : PHASA, 2016. 282 s.
2. Sudovye elektrycheskiye mashyny postoiannoho toka / V. N. Vasylev, Yu. V. Pashchenko. – Odesa : Banto, 2000. - 100 c.
3. Raschet parametrov avtokolebaniy v systeme stabylyzatsyy skorosty vrashcheniya sudovoho heneratora [Elektronnyi resurs] / L.V. Vyshnevskiy, A.M. Veretennyk // Elektromashynobud. ta elektroobladn. - 2005. - Vyp. 64. - S. 28-32.
4. Systemy avtomatycheskoho rehulyrovaniya napriazheniya synkhronnykh heneratorov : monohrafiya / K. H. Konoplev, S. A. Koneva. – Sevastopol : Sevastop. nats. tekhn. un-t, 2007. – 87 с.
5. Sudovyy elektrycheskiye mashyny : nauch.-metod. posobyе / A. M. Oleinykov, V. N. Martynov. - Sevastopol : Yzd-vo SevNTU, 2010. - 316 с.
6. Elektrooborudovanye, elektronnaia apparatura y systemy upravleniya / A.N. Pypchenko, V.V. Ponomarenko, Yu. Y. Teplov, V. A. Shevchenko; Yn-t posledyplom. obrazovaniya "Odes. mor. trenazher. tsentr". - 4-e yzd., pererab. y dop. - Odesa : ТЭС, 2012. - 487 с.
7. Optyimizatsiia roboty bahatoheneratornoi sudnovoi elektroenerhetychnoi systemy / O.Ie. Savenko // Visn. Vinnyts. politekhn. in-tu. - 2012. - № 1. - S. 131-134.
8. Optyimizatsiia roboty sudnovoi elektrostantsii z metoiu pidvyshchennia yakosti elektroenerhii / O. Ye. Savenko // Visn. Vinnyts. politekhn. in-tu. - 2013. - № 6. - S. 74-78.
9. Modelyrovanye dynamycheskykh protsessov v avtonomnoi elektroenerhetycheskoi systeme pry asynkhronnom rezhyme raboty odnogo yz synkhronnykh heneratorov / Y. M. Hvozdeva, V. V. Demyrov // System. tekhnolohii. - 2015. - № 3. - S. 10-20.
10. Lozynskiy A., Moroz V., Paranchuk Ya. Rozv'iazuvannia zadach elektromekhaniky v seredovyshchi paketiv MathCAD i MATLAB: navch. Posibnyk. – Lviv: Vydavnytstvo Derzhavnoho universytetu «Lvivska politekhnika», 2000 – 166 s.

11. Osoblyvosti vyznachennia potuzhnosti dopomizhno-avariinoho elektroprivodu rukhu sudna z kombinovanoi dyzel-elektrychnoiu sylovoi ustanovkoiu / O.M. Rak, V.V. Busher, O.V. Hlazieva // Elektromekh. i enerhozberihaiuchi systemy. - 2020. - № 4. - S. 8-16.
12. Vijay K.G. Power Factor Improvement of Induction Motor by Using Capacitors [Електронний ресурс] / K.G. Vijay // International Journal of Engineering Trends 330 and Technology. – 2013..