

- Prospects and Problems of Satellite Altimetry»], in *Sovremennye problemi okeanolohyy – Modern problems of oceanology*, 2012, vol. 11. (Rus.)
15. I.I. Hladkykh, M.B. Kapochkina, and V.Yu. Zorin, «Kontseptualnye polozheniya monytorynha podvodnoi obstanovky morskoi akvatoryy Azovo-Chernomorskoho rehyona» [«Conceptual provisions for monitoring the underwater situation in the marine waters of the Azov-Black Sea region »], *Pershyi nezaleznyi naukovyi visnyk – The first independent scientific journal*, № 3, pp. 88-94, 2015. (Rus.)
16. V.Y. Mykhailov, V.S. Dorofeev, V.N. Yaroshenko, B.B. Kapochkyn, and N.T. Kucherenko, *Sovremennye yzmeneniya urovnia Chernoho moria kak osnova stratehyi stroytelnoho osvoeniya pryberezh'ya* [Current changes in the Black Sea level as a basis for the strategy of coastal development]. Odesa, Ukraine: Astroprynt Publ., 2010. (Rus.)

Стаття надійшла 28.10.2024

Стаття прийнята 15.11.2024

УДК 681.51:004.89

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321378

© Голубєва С.М.¹, Гороховська О.К.²

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ГРЕБНОЇ ДИЗЕЛЬ-ЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ З УНІПОЛЯРНИМИ МАШИНАМИ

У статті удосконалена динамічна модель гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами, яка, на відміну від відомих моделей, враховує наявність трьох керуючих контурів, які формують магнітні потоки генератора, гребного електродвигуна, швидкість обертання дизеля та одну керуючу (вихідну) змінну: швидкість обертання гвинта, що дозволяє виконати синтез регуляторів контурів управління з заданим динамічним характеристикам. При побудові суднових електроенергетичних систем набувають широкого застосування єдині суднові електроенергетичні системи, які поєднують значну сукупність електротехнічних пристроїв, що функціонально можна розділити на пристрої, які забезпечують електроенергією власні потреби судна, та системи, які забезпечують рух та називаються гребними електричними установками. Метою статті є необхідність удосконалити динамічну модель гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами, що дозволить виконати синтез регуляторів контурів управління з заданим динамічним характеристикам. В якості рушія у дослідженні використані ГРК. У даній статті розглядаються елементи гребної дизель-електричної установки з позицій теорії динамічних систем, на базі яких складається математична модель гребної дизель-електричної установки. Побудована динамічна модель, що має три керуючих контури, які формують магнітні потоки генератора, гребного електродвигуна, швидкість обертання дизеля та одну керуючу (вихідну) змінну: швидкість обертання гвинта. Ця система у подальшому дозволить провести синтез регуляторів контурів управління, що відповідають заданим критеріям оптимізації.

Ключові слова: асинхронні суднові двигуни, електричний кабель, енергоефективність, морський транспорт, напівпровідникові прилади, силова електроніка, суднові двигуни, суднові електроенергетичні установки, діагностування, ефективна потужність, передача потужності, судновий дизель, енергетична установка, судно.

¹ ст. викладач, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0001-8285-7566, glbvnu@gmail.com

² здобувачка ступеня PhD, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ

S. Golubieva, O. Horokhovska. Dynamic model of a propulsion diesel-electric plant with unipolar machines. The article presents an improved dynamic model of a diesel-electric propulsion unit with unipolar machines, which, unlike the known ones, takes into account the presence of three control loops that form the magnetic fluxes of the generator, the propulsion electric motor, the speed of the diesel engine and one control (output) variable: the speed of the propeller, which allows for the synthesis of control loop regulators with given dynamic characteristics. When constructing ship electrical power systems, single ship electrical power systems are widely used, which combine a significant set of electrical devices that can be functionally divided into devices that provide electricity for the ship's own needs and systems that provide movement and are called propulsion electrical units. The purpose of the article is the need to improve the dynamic model of a diesel-electric propulsion unit with unipolar machines, which will allow for the synthesis of control loop regulators with given dynamic characteristics. The research used GRC as the engine. This article considers the elements of a diesel-electric propulsion plant from the perspective of dynamic systems theory, on the basis of which a mathematical model of a diesel-electric propulsion plant is developed. A dynamic model has been constructed that has three control loops that form the magnetic fluxes of the generator, the propulsion electric motor, the diesel engine rotation speed and one control (output) variable: the propeller rotation speed. This system will subsequently allow for the synthesis of control loop regulators that meet the specified optimization criteria.

Keywords: asynchronous marine engines, electric cable, energy efficiency, marine transport, semiconductor devices, power electronics, marine engines, marine power plants, diagnostics, effective power, power transmission, marine diesel, power plant, ship.

Постановка проблеми. На теперішній час при побудові суднових електроенергетичних систем набувають широкого застосування єдині суднові електроенергетичні системи, які поєднують значну сукупність електротехнічних пристроїв, що функціонально можна розділити на пристрої, які забезпечують електроенергією власні потреби судна, та системи, які забезпечують рух та називаються гребними електричними установками (ГЕУ). При цьому потужність, що витрачається на власні потреби судна, досить мала і знаходиться в діапазоні 10..20% у порівнянні з потужністю, переданої на забезпечення руху. У той самий час, ГЕУ мають ряд переваг при порівнянні установок з механічною передачею енергії від теплового двигуна через валопровід до гвинта. Зокрема, при регулюванні швидкості гвинта і маневруванні судна. Тому ГЕУ знаходять усе більше поширення і використання в якості рушійного комплексу судна, що вимагає побудови відповідної динамічної моделі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На теперішній час проєктувальники ГЕУ почали шукати альтернативні варіанти побудови структур суднових енергосистем, які б дозволили зробити систему більш компактною та енергоефективною [1-5] Одним з перспективних варіантів побудови ГЕУ є застосування замість машин змінного струму, уніполярних машин Фарадея, Барлоу [6, 7]. Найбільш детально розглядаються уніполярні машини в якості ГЕУ підвідних човнів у розробках американської компанії General Atomics Electromagnetic Systems [8]. Дослідженням уніполярних машин у складі перспективних видів гребних установок займаються такі підприємства та автори як: А.Б. Захаренко, А.К. Надкін, Rene Fuger, Arkadiy Matsekh, John Kells та ін., компанія Guina Energy Research Pty Ltd, компанія General Atomics Electric Electromagnetic Systems Division; компанія Guina Energy Technologies Pty Ltd; Ккомпанія ThyssenKrupp Marine Systems [9-11].

Дані дослідники пропонують різні методи оптимізації та управління ГЕУ, однак відсутні єдині підходи до управління за критерієм втрати енергії.

Мета статті – удосконалити динамічну модель гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами, що дозволить виконати синтез регуляторів контурів управління з заданим динамічним характеристикам.

Виклад основного матеріалу. Вважаємо, що гребна дизель-електрична установка складається з дизеля, електричного генератора зі збудженням з боку ротора постійним струмом, електродвигуна так само зі збудженням з боку ротора постійним струмом, електричних перетворювачів.

В якості рушія використовується гвинт регульованого кроку (ГРК). У даній статті розглядаються елементи гребної дизель-електричної установки з позицій теорії динамічних систем, на базі яких складається математична модель гребної дизель-електричної установки. Принципова схема гребної дизель-електричної установки наведена на рис. 1.

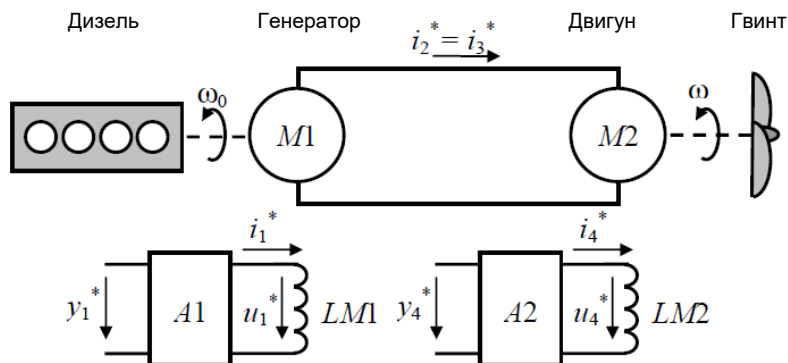


Рис. 1 – Принципова схема гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами

Розглянемо формальний опис навантаження на електродвигун гребної дизель-електричної установки, що створює рушій судна – гвинт. Дана характеристика використовується для моделювання та оптимізації режимів роботи гребної дизель-електричної установки. В якості математичної моделі навантаження будемо використовувати механічну характеристику гвинта – залежність швидкості обертання гвинта від моменту сили опору. Механічну характеристику гвинта визначимо, вважаючи, що при швидкості гвинта $\omega^* = 1$ момент опору гвинта дорівнює [7]:

$$M_{cV}^* = k_v \cdot M_{HV}^*, \quad (1)$$

де k_v – коефіцієнт, що характеризує режим роботи гвинта; $M_{HV}^* = 1 - R_z^*$ – номінальний момент гвинта; R_z^* – опір ланцюга якорів двигуна в умовних одиницях.

Величина $k_v = k_{v1}$ максимальна при роботі гвинта у швартовому режимі, а величина $k_v = k_{v0}$ мінімальна при роботі гвинта у вільній воді. Відношення k_{v0}/k_{v1} , як правило, складає 0,6...0,75. Вибір конкретного значення k_v залежить від призначення судна. Для суден, що працюють в основному у швартових режимах, наприклад, буксирів, криголамів, він вище. Для суден, основний режим роботи яких відбувається у вільній воді, він менше.

При моделюванні коефіцієнт k_v розглядається як зовнішній збуджуючий вплив, величина якого залежить від режиму роботи гвинта. Механічну характеристику гвинта будемо далі апроксимувати квадратичною залежністю вигляду [7]:

$$M_{cV}^* = k_v \cdot M_{HV}^* \cdot \omega^{*2} \cdot \text{sign}(\omega^*). \quad (2)$$

Вигляд механічної характеристики гвинта $\omega(M_{cV}^*)$ наведено на рис. 2.

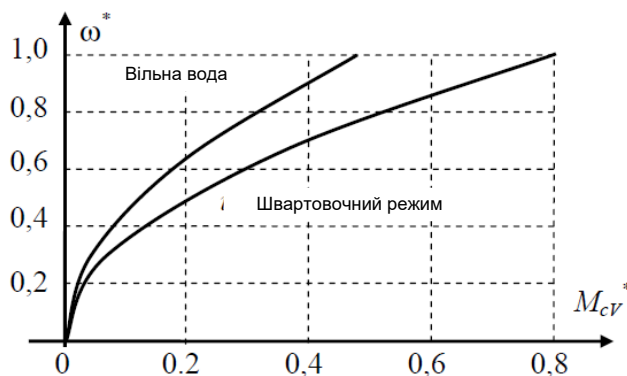


Рис. 2 – Механічна характеристика гвинта

Схема моменту опору гвинта на структурній схемі наведено на рис. 3.

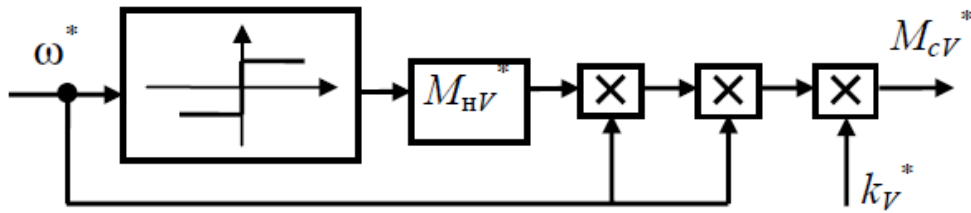


Рис. 3 – Схема моменту опору гвинта на структурній схемі

Структурна схема, наведена на рис. 3, використовується далі для моделювання динамічного поведіння дизель-електричних гребних установках (ДЕГУ) з уніполярними машинами.

Динамічна модель системи «генератор»-«двигун».

Електромеханічний перетворювач ДЕГУ складається з двох уніполярних машин, одна з яких працює в режимі генератора, а інша – у режимі двигуна. Виберемо в якості базових величин номінальні параметри генератора. Рівняння генератора запишемо у такому вигляді:

$$\begin{aligned} u_1 &= R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot p i_1; \\ u_2 &= R_2 \cdot i_2 + L_2 \cdot p i_2 + L_{21} \cdot \omega \cdot i_1, \end{aligned} \quad (3)$$

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.

Рівняння двигуна має вигляд:

$$\begin{aligned} u_4 &= R_4 \cdot i_4 + L_4 \cdot p i_4; \\ u_3 &= R_3 \cdot i_3 + L_3 \cdot p i_3 + L_{34} \cdot \omega_0 \cdot i_4, \end{aligned} \quad (4)$$

де R_4 – опір обмотки збудження;

L_4 – індуктивність обмотки збудження;

i_4 – струм обмотки збудження;

L_3 – опір обмотки якоря;

L_3 – індуктивність розсіювання обмотки якоря;

L_{34} – взаємна індуктивність обмоток якоря та збудження;

ω_0 – швидкість обертання якоря.

Позначимо потокозчеплення обмотки якоря з обмоткою збудження генератора $\psi_{12} = L_{21} \cdot i_1$, а потокозчеплення обмотки якоря з обмоткою двигуна $\psi_{34} = L_{34} \cdot i_4$.

Тоді електрорушійна сила (ЕРС) двигуна $E_2 = \psi_{34} \cdot \omega$. Змінимо напрям струму двигуна на протилежний. Оскільки обмотки якоря з'єднані послідовно, то $u_3 = u_2$. З урахуванням цих зауважень рівняння системи генератор-двигун приймуть наступний вигляд:

$$\begin{aligned} u_1 &= R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot p i_1; \\ 0 &= R_z \cdot i_2 + L_z \cdot p i_z + E_1 - E_2; \\ u_4 &= R_4 \cdot i_4 + L_4 \cdot p i_4, \end{aligned} \quad (5)$$

де $R_z = R_1 + R_3$; $L_z = L_2 + L_3$; i_4 – струм обмотки збудження генератора; i_1 – струм обмотки збудження двигуна; u_1 – напруга обмотки збудження двигуна; u_4 – напруга обмотки збудження генератора; ω_0 – кутова швидкість обертання ротора генератора; ω – кутова швидкість обертання ротора двигуна.

Рівнянню (5) відповідає схема заміщення системи генератор-двигун, наведена на рис. 4.

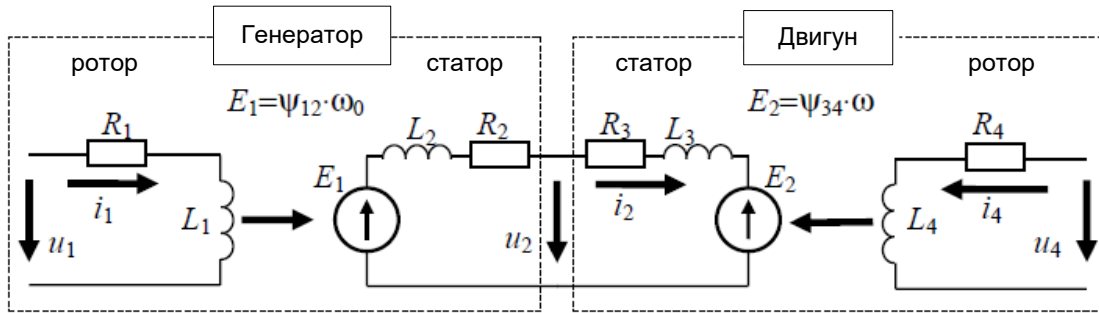


Рис. 4 – Схема заміщення обмоток системи генератор-двигун

Рівнянням (5) й схемі заміщення (рис. 4) може бути поставлена у відповідність структурна схема, наведена на рис. 5.

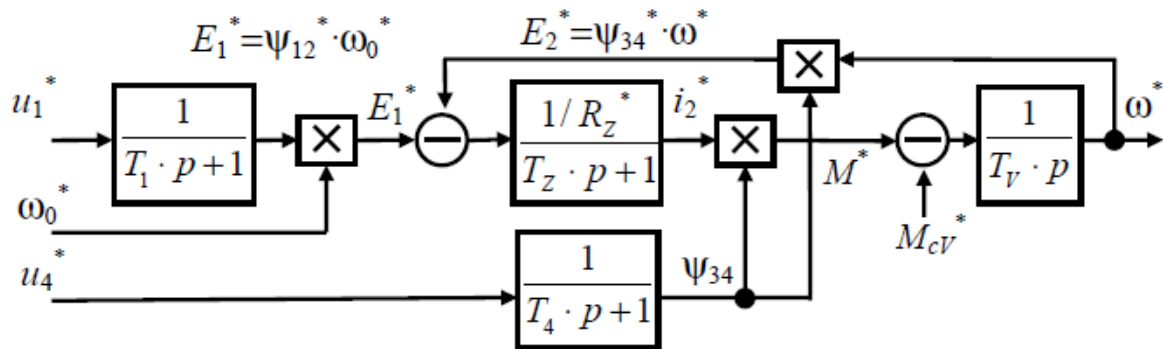


Рис. 5 – Структурна схема системи генератор-двигун

Уніполярний генератор розвиває електромагнітний момент, який є моментом опору для дизеля:

$$M_{cD}^* = \psi_{12}^* \cdot i_2^* = L_{12}^* \cdot i_1^* \cdot i_2^*, \quad (6)$$

де $\psi_{12}^* = L_{12}^* \cdot i_1^* \in [0,1]$ – потокозчеплення обмотки збудження з обмоткою якоря; i_1^* – струм обмотки збудження; i_2^* – струм обмотки якоря.

Уніполярний двигун розвиває електромагнітний момент, який є рушійним моментом для гвинта [12]:

$$M^* = \psi_{34}^* \cdot i_4^* = L_{34}^* \cdot i_4^* \cdot i_2^*, \quad (7)$$

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

Рівняння руху якоря і гвинта:

$$J \cdot p \cdot \omega = M - M_{Vc}, \quad (8)$$

де J – інтегральний момент інерції якоря двигуна, валопроводу та гвинта; M_{Vc} – момент опору гвинта.

У відносних одиницях рівняння руху прийме наступний вигляд:

$$T_v \cdot p \cdot \omega^* = M^* - M_{Vc}^*, \quad (9)$$

де M_{Vc}^* – момент опору в відносних одиницях; $T_v = J \cdot \omega_6 / M_6$ – механічна постійна часу двигуна, валопроводу та гвинта.

Динамічна модель перетворювачів.

Сучасні перетворювачі будуються на основі силової електроніки й мають імпульсний принцип дії. Динамічна модель перетворювача достатньо складна. Тому розглядається наближена передатна функція перетворювача, яка використовується у динамічній моделі ДЕГУ. Структурно перетворювач можна розділити на силову частину й систему управління [7, 8]. Силова частина реалізується на електронних ключах, що періодично включаються й модулюють вихідну змінну. Нехай період проходження імпульсів, які моделюють вихідну змінну перетворювача, дорівнює T_i . Тоді передатну функцію силової частини перетворювача можна представити елементом затримки: $e^{-T_i p}$.

Оскільки період слідування імпульсів T_i малий, то елемент затримки можна представити наближено двома членами ряду:

$$e^{-T_i p} \approx 1 - T_i \cdot p \approx \frac{1}{1 + T_i p}. \quad (10)$$

З даних викладень випливає, що динамічну поведінку силової частини перетворювача можна представити аперіодичною функцією першого порядку.

Система управління перетворювача зазвичай реалізується на основі мікропроцесора і має істотно більшу швидкість, ніж силова частина. Отже, її можна вважати безінерційним елементом. Однак в алгоритм системи управління доцільно штучно включити аперіодичний елемент з постійною часу T_{cy} .

Тоді перетворювач буде аперіодичним елементом другого порядку:

$$W_{cy} = \frac{1}{T_i p + 1} \cdot \frac{k}{T_{cy} p + 1}, \quad (11)$$

де k – коефіцієнт передачі перетворювача.

Використання мікропроцесорної техніки дозволяє завжди зробити перетворювач лінійним елементом, а штучне включення в систему аперіодичного елементу згладжує помилки, пов'язані з апроксимацією силової частини перетворювача. За базове значення будемо приймати таке значення вихідної величини системи управління U_6 , якому відповідає базове значення вихідної величини електричного перетворювача. З іншого боку, електричний перетворювач формується так, щоб базове значення вихідної величини дорівнювало відповідному базовому значенню електродвигуна U_n .

Отже, статичний коефіцієнт передачі U_n/U_6 встановлює коефіцієнт приведення між базовими величинами силової частини електроприводу та керуючого пристрою.

Таким чином, при синтезі системи управління коефіцієнт передачі між електричним перетворювачем та управляючим пристроєм у відносних одиницях приймає одиничне значення. При надходженні на вхід електричного перетворювача одиничного (базового) сигналу на виході також буде одиничний (базовий) сигнал. Структурна схема перетворювача буде мати вигляд, наведений на рис. 6.

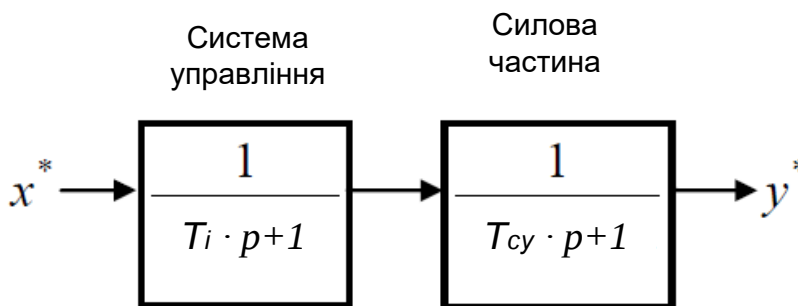


Рис. 6 – Передаточна функція перетворювача

Таким чином, при синтезі системи управління коефіцієнт передачі між електричним перетворювачем та управляючим пристроєм у відносних одиницях приймає одиничне значення. При надходженні на вхід електричного перетворювача одиничного (базового) сигналу на виході

також буде одиничний (базовий) сигнал. Представлення перетворювача на структурній схемі буде мати вигляд, як на рис. 6.

Перетворювачі А1 та А2 (див. рис. 1) підключаються до обмоток збудження уніполярних машин. Отже, на структурній схемі їх можна навести у вигляді послідовно включених аперіодичних елементів (рис. 7).

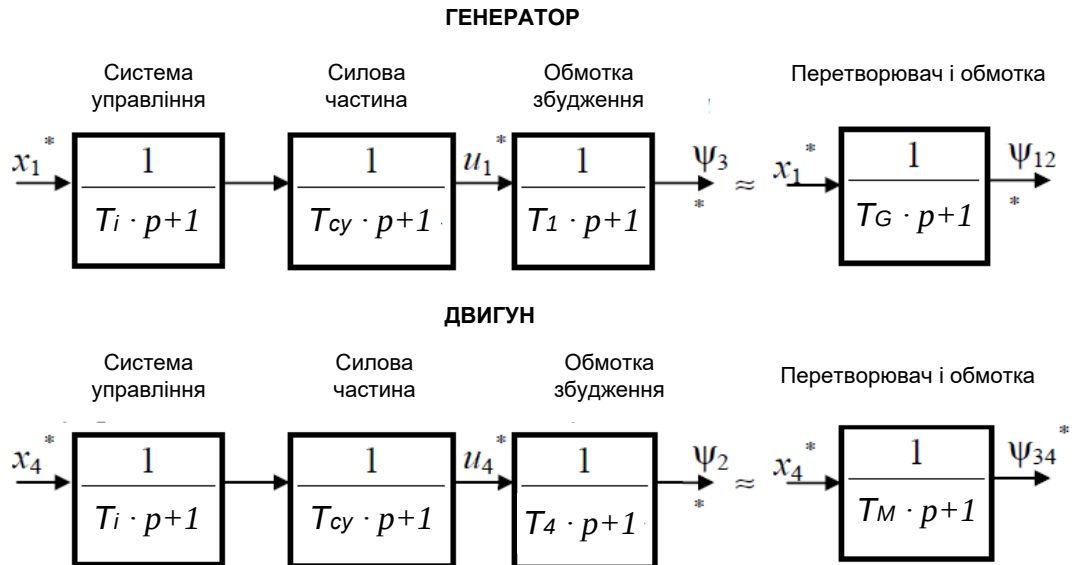


Рис. 7 – Передатні функції перетворювачів і обмоток збудження генератора та двигуна

Передатна функція перетворювачів та обмоток збудження генератора та двигуна будуть аперіодичним елементом третього порядку. Аперіодичний елемент третього порядку досить добре апроксимується аперіодичними елементами першого порядку (рис. 7), постійна часу якого дорівнює сумі постійних часу ланок:

$$\begin{aligned} T_G &= T_i + T_{cy} + T_1; \\ T_M &= T_i + T_{cy} + T_4. \end{aligned} \quad (12)$$

Похибка апроксимації перехідної функції у випадку рівних значень постійних часу не перевищує 2%. У випадку нерівних постійних часу похибка буде менше.

Таким чином, при моделюванні перехідних процесів у ГДЕУ в структурній схемі перетворювачі об'єднуються з обмотками збудження генератора й двигуна та наводяться аперіодичним елементом першого порядку. Коефіцієнти передачі елементів мають одиничне значення, а постійні часу визначаються формулою (12).

Динамічна модель дизеля.

Будемо розглядати дизель як масу, до якої прикладається сумарний момент сили. Величину моменту рушійної сили M_D визначимо, як функцію витрати палива в одиницю часу, спожитого дизелем G_0 :

$$M_D = k_M \cdot G_0, \quad (13)$$

де k_M – коефіцієнт пропорційності.

Момент внутрішнього опору дизеля M_{c0} будемо розглядати як силу сухого тертя:

$$M_{c0} = M_0 \cdot \text{sign}(\omega_0). \quad (14)$$

При дослідженнях використовуються відносні одиниці. У відносних одиницях моменту рушійної сили:

$$M_D^* = k_M^* \cdot G_0^*. \quad (15)$$

Крім моменту сили внутрішнього опору, на дизель діє зовнішня сила з боку генератора виду (6).

Обертання вала дизель-генератора описується рівняння руху Ньютона:

$$T_D \cdot p \cdot \omega_0^* = M_D^* - M_{cD}^* - M_{c0}^*, \quad (16)$$

де $T_D = J_D \cdot \omega_6 / M_6$ – механічна постійна часу дизель-генератора;

J_D – сумарний момент інерції дизель-генератора;

ω_6 – базове значення швидкості;

M_6 – базове значення моменту.

Представимо, що дизель має контур швидкості з пропорційним регулятором типу Уатта [5] та коефіцієнтом зворотного зв'язку $k_{oc}^* = 1$. Структурна схема, яка характеризує динамічну поведінку дизеля, наведена на рис. 8.

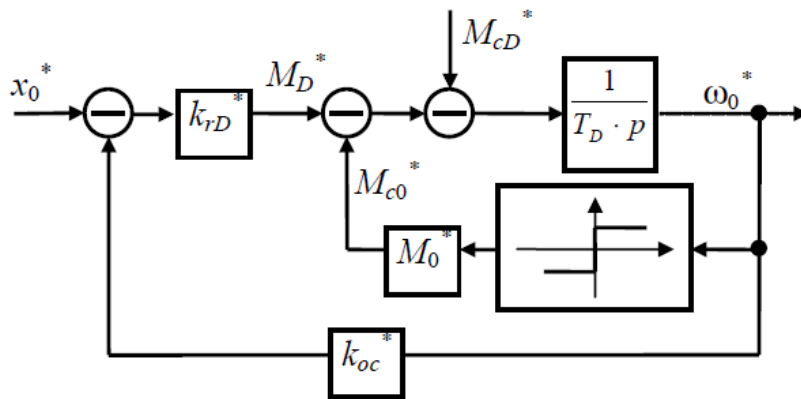


Рис. 8 – Структурна схема дизеля з пропорційним регулятором швидкості

Внутрішній зворотний зв'язок за швидкістю визначає мінімальне значення витрати палива в одиницю часу, що споживається дизелем на холостому ходу і гарантує стійку роботу двигуна: $G_0^* > M_0^*$.

Управляюча змінна x_0^* задає величину швидкості обертання дизеля. Статична механічна характеристика дизеля $\omega_0^*(M_{cD}^*)$ знаходиться з рівняння:

$$(x_0^* - k_{oc}^* \cdot \omega_0^*) \cdot k_{rD}^* - M_0^* - M_{cD}^* = 0. \quad (17)$$

Зовнішній зворотний зв'язок за швидкістю формує жорстку механічну характеристику дизеля:

$$\omega_0^*(M_{cD}^*) = \frac{x_0^*}{k_{oc}^*} - \frac{(M_0^* + M_{cD}^*)}{k_{oc}^* \cdot k_{rD}^*}. \quad (18)$$

При наборі моменту навантаження M_{cD}^* швидкість дизеля провалюється на величину:

$$\omega_0^* = \frac{M_{cD}^*}{k_{oc}^* \cdot k_{rD}^*}. \quad (19)$$

З даної формули можна зробити висновок, що провал частоти обертання дизеля визначається коефіцієнтом зворотного зв'язку k_{rD}^* . Оскільки величина k_{rD}^* , як правило, достатньо значна, то величина ω_0^* достатньо мала.

Передатна функція дизеля по керуючому впливі при пропорційному регуляторі швидкості дорівнює:

$$W_D = \frac{1}{T_{rD0} \cdot p + 1}, \quad (20)$$

де $T_{rD0} = T_D / k_{rD}^*$.

Динамічна модель ГДЕУ з уніполярними машинами формується на базі динамічних моделей її елементів: дизеля, генератора-двигуна та гвинта. Структурні схеми цих елементів наведені відповідно на рис. 3, 5, 8. Структурна схема ГДЕУ наведена на рис. 9.

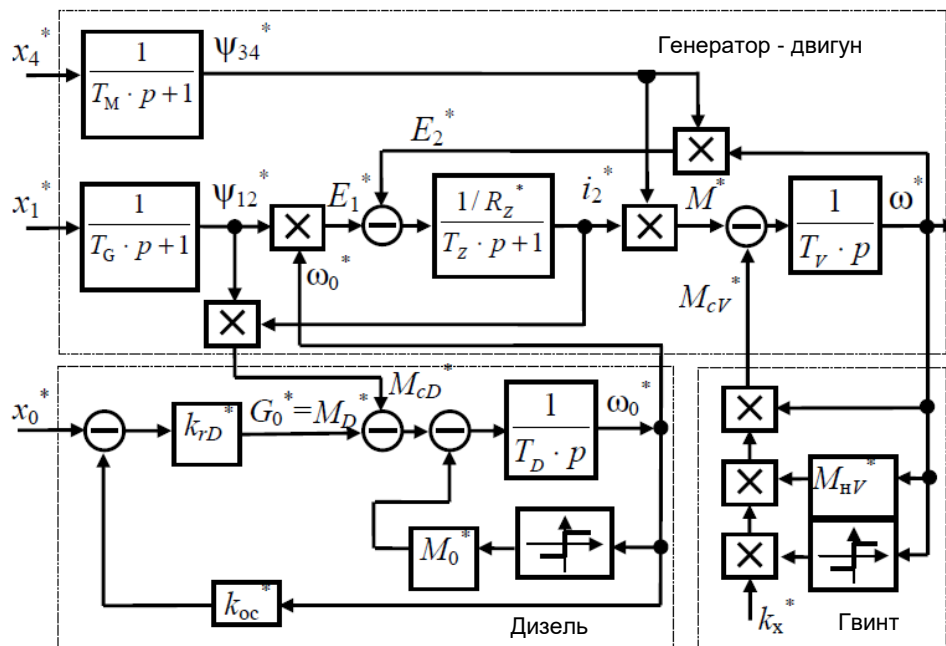


Рис. 9 – Структурна схема системи дизель-генератор-двигун-гвинт

Дана структурна схема відображає математичну модель системи.

Висновки

Таким чином, побудована динамічна модель, що має три керуючих контури, які формують магнітні потоки генератора, гребного електродвигуна, швидкість обертання дизеля та одну керуючу (вихідну) змінну: швидкість обертання гвинта. Ця система у подальшому дозволить провести синтез регуляторів контурів управління, що відповідають заданим критеріям оптимізації.

Перелік використаних джерел:

1. Енергоефективність суднових енергетичних установок в Україні: стан та перспективи розвитку / О. Россомаха та ін. *Science and Practice: Implementation to Modern Society* : Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference, Manchester, Great Britain, 26-28 April 2023. С. 517-520.
2. Включение синхронных генераторов в многоагрегатную судовую электростанцию / Вишневский Л. В., Веретенник А. М., Войтецкий И. Е., Козырев И. П. *Електромашинобудування та електрообладнання*. 2007. № 68. С. 26-29.
3. Electric power generation with magnetically geared machine: pat. 8044527 USA: F03D9/00, H02P9/14. № 11/861,759; filed 26.09.2007; publ. 25.10.2011. 16 p.
4. Power Factor Correction. Power Factor Controller BR7000-I series. URL: <http://www.processtechnique.com> (дата звернення: 10.05.2024).
5. Acomi N., Acomi O. C. The influence of different types of marine fuel over the energy efficiency operational index. Union General Assembly. *Energy Procedia*. 2014. № 59. Pp. 243-248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.373>.
6. Бурбело М.Й. Компенсация реактивной мощности асинхронных двигателей в резкоизменяющихся режимах навантаження. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2008. № 1. С. 65-68.
7. Спосіб управління автономною електроенергетичною системою та пристрій для його здійснення: пат. 116656 Україна: МПК (2006.01), G05F 1/70, H02J 3/18, H02J 3/38, H02P 9/46. № а201511808; заявл. 30.11.2015; опубл. 25.04.2018, Бюл. № 8. 7 с.

8. Serra P., Fancello G. Towards the IMO's GHG Goals: A Critical Overview of the Perspectives and Challenges of the Main Options for Decarbonizing International Shipping. *Sustainability*. 2020. № 12(8). Article 3220. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12083220>.
9. Вишне夫斯基 Л. В., Муха Н. И., Павленко С. С. Пуск асинхронных электродвигателей с компенсацией реактивной мощности: Монография. Одесса : НУ «ОМА», 2016. 161 с.
10. Дранкова А. О., Муха Н. И. Использование нейронных сетей прямого распространения для прогнозирования технического состояния судовых дизель-генераторов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. 2013. № 36. С. 505-506.
11. Determining energy-efficient operation modes the propulsion electrical motor of an autonomous swimming apparatus / Volyanskaya Y., Volyanskiy S., Volkov A., Onishchenko O. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 6/8 (90). Pp. 11-16. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118984>.
12. Analysis of the operational ship energy efficiency considering navigation environmental impacts / Yuan Y., Li Z., Malekian R., Yan X. *Journal of Marine Engineering & Technology*. 2017. Vol. 16. № 3. Pp. 150-159. DOI: <https://doi.org/10.1080/20464177.2017.1307716>.

References:

1. O. Rossomakha et al., «Enerhoefektyvnist sudnovykh enerhetychnykh ustanovok v Ukraini: stan ta perspektyvy rozvytku» [«Energy efficiency of ship power plants in Ukraine: status and development prospects»], in Proc. 14th Int. Sci. and Pract. Conf. «Science and Practice: Implementation to Modern Society», Manchester, Great Britain, 2023, pp. 517-520. (Ukr.)
2. L.V. Vyshnevskiy, A.M. Veretennyk, Y.E. Voitetskiy, and Y.P. Kozyrev, «Vkliucheniye synkhronnykh heneratorov v mnogoahrehatnuiu sudovuiu elektrostantsiyu» [«Inclusion of synchronous generators in a multi-unit marine power plant»], *Elektromashynobuduvannia ta elektroobladnannia. – Electrical engineering and electrical equipment*, № 68, pp. 26-29, 2007. (Rus.)
3. J. Mari, M.-W. Waszak, and S. Schramm, «Electric power generation with magnetically geared machine», *U.S. Patent 8044527 Appl. 11/861,759*, Oct. 25, 2011.
4. Power Factor Correction. Power Factor Controller BR7000-I series. [Online]. Available: <http://www.processtechnique.com>. Accessed on: May 10, 2024.
5. N. Acomi, and O.C. Acomi, «The influence of different types of marine fuel over the energy efficiency operational index», *Energy Procedia*, № 59, pp. 243–248, 2014. doi: **10.1016/j.egypro.2014.10.373**.
6. M.I. Burbelo, «Kompensatsiia reaktyvnoi potuzhnosti asynkhronnykh dyhuniv v rizkozmynnykh rezhymakh navantazhennia» [«Compensation of reactive power of induction motors in rapidly changing load conditions»], *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, № 1, pp. 65-68, 2008. (Ukr.)
7. L.V. Vyshnevskiy, M.I. Mukha, and O.P. Tumolskiy, «Sposib upravlinnia avtonomnoiu elektroenerhetychnoiu systemoiu ta prystrii dlia yoho zdiisnennia» [«Method of controlling an autonomous electric power system and device for its implementation»], *UA Patent 116656 Appl. № a201511808*, Apr. 25, 2018. (Ukr.)
8. P. Serra, G. Fancello, «Towards the IMO's GHG Goals: A Critical Overview of the Perspectives and Challenges of the Main Options for Decarbonizing International Shipping», *Sustainability*, № 12(8), article 3220, 2020. doi: **10.3390/su12083220**.
9. L.V. Vyshnevskiy, N.Y. Mukha, and S.S. Pavlenko, *Pusk asynkhronnykh elektrodyhatelei s kompensatsiei reaktyvnoi moshchnosti: Monohrafiya* [Starting of asynchronous electric motors with reactive power compensation: Monograph]. Odessa: NU «OMA» Publ., 2016. (Rus.)
10. A.O. Drankova, and N.Y. Mukha, «Yspolzovaniye neironnykh setei priamoho rasprostraneniya dlia prohozyrovaniya tekhnicheskogo sostoiyaniya sudovykh dyzel-heneratorov» [«Using Feedforward Neural Networks to Predict the Technical Condition of Marine Diesel Generators»], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Problemy avtomatyzovanoho elektropryvodu. Teorii i praktyka – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Problems of automated electrodrive. Theory and practice*, № 36, pp. 505-506, 2013.
13. Y. Volyanskaya, S. Volyanskiy, A. Volkov, and O. Onishchenko, «Determining energy-efficient operation modes the propulsion electrical motor of an autonomous swimming apparatus», *Eastern-*

European Journal of Enterprise Technologies, vol. 6/8 (90), pp. 11-16, 2017. doi: 10.15587/1729-4061.2017.118984.

11. Y. Yuan, Z. Li, R. Malekian, and X. Yan, «Analysis of the operational ship energy efficiency considering navigation environmental impacts», *Journal of Marine Engineering & Technology*, vol. 16, № 3, pp. 150-159, 2017. doi: 10.1080/20464177.2017.1307716.

Стаття надійшла 25.10.2024

Стаття прийнята 09.11.2024

УДК 358.42:629.563

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321381

© Заєць А.Ю.¹, Коскіна Ю.О.², Дрожин О.Л.³

SWOT-АНАЛІЗ У СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ МОРСЬКИХ БУРОВИХ ПЛАТФОРМ

Стаття присвячена аналізу ризиків, які супроводжують обслуговування та експлуатацію морських бурових платформ, що є критично важливими об'єктами нафтової та газової промисловості. Основними ризиками для цих платформ є фізичні загрози (шторми, високі хвилі, корозія обладнання), технічні проблеми, людський фактор і екологічні загрози, зокрема забруднення внаслідок витоків нафти. У дослідженні розглянуто сучасні методи управління ризиками, що дозволяють знизити ймовірність аварійних ситуацій, зокрема: комп'ютерне моделювання, симуляції, аналіз видів і наслідків відмов (FMEA), Інтернет речей (IoT) для моніторингу стану обладнання, а також регулярні аудити й тренінги для персоналу. Особлива увага приділяється новітнім технологіям, які значно покращують управління ризиками. Наприклад, цифрові двійники надають можливість створювати цифрові копії реальних об'єктів і прогнозувати їхню поведінку у різних сценаріях, аналітика великих даних дозволяє виявляти закономірності для передбачення технічних несправностей, а автоматизація і штучний інтелект сприяють ранньому виявленню можливих проблем. SWOT-аналіз продемонстрував, що сильними сторонами платформ є наявність висококваліфікованого персоналу та сучасних технологій моніторингу. Однак високі витрати на інновації та залежність від людського фактору залишаються значними викликами. Серед можливостей – розвиток нових технологій безпеки та вдосконалення міжнародних стандартів, що підвищить ефективність управління ризиками. Основними загрозами є несприятливі погодні умови, екологічні катастрофи та ризик кібератак. Результати дослідження демонструють важливість інтеграції сучасних технологій в управління ризиками для зниження аварійності та забезпечення стабільної роботи платформ. Висновки статті підкреслюють, що використання інновацій та регулярне вдосконалення стратегій управління ризиками є ключовими чинниками для забезпечення безпечної експлуатації морських бурових платформ.

Ключові слова: морські бурові платформи, управління ризиками, штучний інтелект, аналітика великих даних, екологічна безпека, прогнозування технічних несправностей, людський фактор, дистанційний моніторинг, кібератаки, стандарти безпеки.

¹ канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: 0000-0002-5803-9069, au.lopatnyova@gmail.com

² д-р техн. наук., професор, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: 0000-0002-3164-6504, yuliia.koskina@ukr.net

³ канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: 0000-0002-9695-9296, alexey.drozhhyn@ukr.net