

С. О. САМОЙЛОВ, В. В. ПОЛИВОДА
Херсонська державна морська академія

ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ СУДНОВОЮ ГРЕБНОЮ ДИЗЕЛЬ-ЕЛЕКТРИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ

Робота зосереджена на вирішенні комплексної науково-технічної проблеми підвищення енергоефективності сучасних суден, оснащених дизель-електричними гребними установками. В умовах жорсткої регламентації викидів парникових газів та шкідливих речовин (відповідно до вимог ІМО MARPOL, EEDI, EEOI) та нестабільності світових цін на енергоносії, питання оптимізації керування судновими пропульсивними комплексами набуває критичного значення.

Протягом дослідження було проведено огляд сучасних публікацій на тематику вирішення цієї проблеми. Дослідники пропонують використовувати генетичні алгоритми, динамічне програмування та стохастичні методи. Також оглянуто еволюція методів оптимізації: від стратегій мінімізації еквівалентного споживання до систем керування на основі прогнозуючих моделей. Значна увага приділяється проблематиці існуючих методів оптимізації, яка полягає в тому, що більшість пропонуємих підходів мають критичні недоліки: вони або занадто спрощені (статичні моделі балансу потужності, які ігнорують перехідні процеси), або надмірно складні для реалізації в бортових контролерах. Також виявлено, що недостатньо опрацьовано залишається комплексна постановка задачі, яка б поєднувала підсистему руху судна (із залежністю опору від стану моря), підсистему генерації (із нелінійними витратними характеристиками дизелів) та підсистему розподілу енергії в єдиному просторі станів. Крім того проаналізовано конструкції сучасних гребних установок на прикладі гребної дизель-електричної установки та побудовано структурну схему та динамічну модель системи. Розглянуто принципи роботи машини постійного струму гребної дизель-електричної установки (ГДЕУ) та переваги при використанні на морських суднах.

Основну частину роботи займає наукове обґрунтування та постановка задачі енергозберігаючого оптимального керування ГДЕУ. Зроблені висновки, що одним зі шляхів оптимізації енергетичної ефективності ГДЕУ виступає підвищення якості керування передачею енергії від дизельного двигуна до гвинта. Розглянуто спосіб побудови алгоритму оптимального керування за критерієм мінімуму втрат енергії у всіх елементах ГДЕУ на шляху перетворення.

Ключові слова: морський транспорт, енергоефективність, оптимізація, дизель-електрична гребна установка, оптимальне керування, математичне моделювання, вплив на навколишнє середовище.

S. O. SAMOILOV, V. V. POLYVODA
Kherson State Maritime Academy

OPTIMAL CONTROL PROBLEM OF A SHIP PROPULSION DIESEL-ELECTRIC SYSTEM

The work is dedicated to solving the complex scientific and technical problem of increasing the energy efficiency of modern vessels equipped with diesel-electric propulsion systems. In conditions of strict regulation of greenhouse gas emissions and harmful substances (in accordance with the requirements of IMO MARPOL, EEDI, and EEOI) and the instability of world energy prices, the issue of optimizing ship propulsion system control is becoming critical.

During the research, a review of modern publications on the topic of solving these problems was conducted. The researchers propose to use genetic algorithms, dynamic programming, and stochastic methods. The evolution of optimization methods is also reviewed: from strategies to minimize equivalent consumption to control systems based on predictive models. Special attention is devoted to the limitations of existing optimization methods, as many proposed approaches exhibit a critical disadvantage: they are either too simplified (static power balance models that ignore transients) or too complex to be implemented in on-board controllers. It is also found that a comprehensive formulation of the problem, which would combine the ship's propulsion subsystem (with the dependence of resistance on the sea state), the generation subsystem (with nonlinear consumption characteristics of diesel engines), and the energy distribution subsystem in a single state space, remains insufficiently developed. Moreover, the designs of modern propulsion systems are analyzed using the example of a diesel-electric propulsion system, and a structural diagram and dynamic model of the system are built. The principles of operation of a DC motor for a diesel-electric propulsion system, and the profits of using it on marine vessels, are considered.

The research focused on the scientific substantiation and mathematical formulation of energy-saving optimal control for a diesel-electric propulsion system. It is concluded that one of the ways to optimize the energy efficiency

of a diesel power plant is to improve the quality of control of energy transfer from the diesel engine to the propeller. A method for constructing an optimal control algorithm based on the criterion of minimal energy losses in all elements of a diesel power plant along the conversion path is considered.

Keywords: maritime transport, energy efficiency, optimization, diesel-electric propulsion, optimal control, mathematical modelling, environmental impact.

Постановка проблеми

Сучасний етап розвитку світового суднобудування та морського транспорту характеризується докорінною зміною парадигми проектування та експлуатації суден. Якщо раніше домінуючими критеріями були вантажопідйомність та швидкість доставки, то сьогодні на перший план виходять енергетична ефективність та екологічна безпека. Міжнародна морська організація (ІМО) послідовно впроваджує нові, більш жорсткі стандарти, спрямовані на декарбонізацію галузі. Зокрема, запровадження індексу енергоефективності конструкції (Energy Efficiency Design Index – EEDI) для нових суден та індексу енергоефективності експлуатації (Energy Efficiency Operational Indicator – EEOI) для існуючого флоту вимагають від судновласників та проектувальників пошуку принципово нових технічних рішень [1]. З 2021 року обмеження стосуються не лише вмісту сірки в паливі (обмеження 0,5 % замість попередніх 3,5 % поза зонами контролю викидів), але й жорсткого лімітування викидів оксидів азоту (NO_x) для суден, побудованих після цієї дати [2].

У цьому технологічному контексті гребні дизель-електричні установки (ГДЕУ) займають особливе місце і стають де-факто стандартом для багатьох типів спеціалізованих суден: криголамів, газозовів (LNG-танкерів), круїзних лайнерів, суден забезпечення платформ (PSV) та науково-дослідних суден. На відміну від традиційних установок з прямим механічним приводом від малооберткових дизелів на гвинт, ГДЕУ забезпечують значну гнучкість у компонованні машинного відділення, покращені маневрені характеристики, знижений рівень шуму та вібрації, а також підвищену надійність за рахунок резервування потужності [3].

Ключовою перевагою ГДЕУ є відокремлення механічного зв'язку між первинним рушієм (дизелем) та споживачем (гвинтом). Це дає можливість оптимізації режимів роботи дизель-генераторів (ДГ) незалежно від обертів гребного гвинта. У системах з прямою передачею оберти двигуна жорстко прив'язані до швидкості судна, що змушує двигун працювати на неоптимальних часткових режимах при зниженні ходу. У ГДЕУ система керування (Power Management System – PMS) може варіювати кількість працюючих агрегатів, завантажуючи їх до номінального рівня, де питома витрата палива (Specific Fuel Oil Consumption – SFOC) є мінімальною [4].

Проте, сам факт наявності електричної передачі потужності не гарантує автоматичного підвищення енергоефективності. Більше того, ГДЕУ вносить додаткові ланки перетворення енергії (механічна енергія дизеля – електрична енергія генератора – перетворення в частотному перетворювачі – механічна енергія електродвигуна – гідродинамічна енергія гвинта). Кожен етап супроводжується втратами. Якщо система керування не реалізує оптимальні алгоритми розподілу навантаження та вибору режимів, сумарний коефіцієнт корисної дії (ККД) установки може бути нижчим, ніж у традиційних механічних систем, особливо на номінальних режимах повного ходу [5].

Традиційні підходи до керування ГДЕУ часто базуються на детермінованих правилах (Rule-based control) та статичних характеристиках. Такі системи ефективно працюють у сталих режимах на «спокійній воді», але мають суттєві обмеження у реальних експлуатаційних умовах, які характеризуються високою динамікою та стохастичністю. Шторми, вітрові навантаження, маневрування призводять до значних коливань моменту опору на гвинті. Статичні регулятори не здатні передбачити ці зміни, що призводить до запізнювання реакції дизель-генераторів, їх роботи в перехідних режимах з підвищеною витратою палива, задимленням та підвищеним зносом циліндро-поршневої групи [6]. Крім того, існуючі методи часто не враховують

взаємний вплив гідродинаміки корпусу та електромагнітних процесів у генераторах, розглядаючи їх як ізольовані підсистеми.

Наукова проблема полягає у необхідності розробки математично обґрунтованої постановки задачі оптимального керування ГДЕУ, яка б враховувала багатовимірність системи, сильну нелінійність характеристик її елементів. Вирішення цієї проблеми дозволить створити алгоритмічну базу для автоматизованих систем керування (Energy Management Strategy – EMS) нового покоління, здатних мінімізувати експлуатаційні витрати та екологічний вплив судна в реальному часі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Класичні дослідження в галузі суднової енергетики фокусувалися переважно на оптимізації стаціонарних режимів роботи. Наприклад, роботи, присвячені розподілу навантаження між паралельно працюючими дизель-генераторами, часто зводяться до задач лінійного програмування або змішано-цілочисельного лінійного програмування [7]. У таких задачах метою є вибір комбінації працюючих агрегатів для покриття поточного, усередненого попиту на потужність з мінімальними витратами.

Окрім дослідження пропонують генетичні алгоритми для визначення оптимальної конфігурації кількості та типу двигунів на етапі проектування, а також для стратегії розподілу навантаження в умовах часткових навантажень. Оптимізований розподіл навантаження між чотирма дизель-генераторами може заощадити близько 0.58 % палива порівняно з рівномірним розподілом при навантаженні 23 000 кВт [4]. Хоча відсоток здається невеликим, у масштабах річної експлуатації великого судна це тонни палива. Проте, такі підходи мають суттєві обмеження у вирішенні задач в реальному часі при швидкозмінних навантаженнях. Вони не враховують інерційність теплових та механічних процесів, а також динаміку зміни зовнішніх умов. «Статичний» оптимум може виявитися недосяжним або небезпечним під час перехідного процесу, викликаючи нестабільність в електромережі.

Метод динамічного програмування розглядається як еталонний метод для знаходження глобального оптимуму витрати палива для апріорі відомого профілю навантаження [8].

У роботі LNG-газовозів з двопаливними двигунами застосовується модель оптимізації, яка базується на даних, які періодично отримуються з бортових систем. Результати показують значний потенціал економії при керованому перерозподілі навантаження [4]. Однак, головним недоліком є необхідність повного знання майбутнього профілю навантаження, що неможливо в реальних умовах експлуатації судна, де погодні умови змінюються стохастично. Тому цей підхід часто використовується для оцінки ефективності інших стратегій, реалізованих у реальному часі, або для налаштування правил в евристичних контролерах.

Окремий напрямок досліджень стосується врахування стохастичності на морі. Розглянуті роботи підкреслюють складність позиціонування та руху судна в штормових умовах (до 9 балів) [9]. Використання спрощених моделей опору «на спокійній воді» призводить до значних помилок у прогнозуванні енергоспоживання. Сучасні підходи вимагають інтеграції ймовірнісних моделей хвилювання у контур керування.

Значна частина сучасних робіт присвячена адаптації класичних варіаційних методів оптимального керування, таких як принцип максимуму Понтрягіна. У роботах показано, що такі методи дозволяють звести задачу глобальної оптимізації на інтервалі часу до послідовності задач миттєвої мінімізації функції Гамільтона. Це робить метод обчислювально більш ефективним порівняно з динамічним програмуванням [10].

Для суднових гібридних установок принцип Понтрягіна успішно застосовується для оптимального керування потоками енергії, де відповідні змінні інтерпретуються як еквівалентна вартість споживання енергії батареї [10].

Найбільш поширеним методом оптимізації в реальному часі є стратегія мінімізації еквівалентного споживання (Equivalent Consumption Minimization Strategy – ECMS). Суть методу полягає у переведенні споживання електроенергії від батареї до потенційної витрати палива, що дозволяє порівнювати вартість енергії у кожний момент часу. Однак, класична ECMS є чутливою до вибору коефіцієнта еквівалентності, який має змінюватися залежно від умов плавання [11].

Більш досконалим підходом є керування на основі прогнозуючої моделі (Model Predictive Control – MPC). Цей метод дозволяє враховувати жорсткі обмеження на змінні стану та керування (наприклад, обмеження на швидкість зміни струму, моменту, температури вихлопних газів) безпосередньо в процесі оптимізації на кожному кроці керування. Застосування нелінійного MPC для стабілізації швидкості суднового дизеля дозволяє компенсувати невизначеність моделі та зовнішні збурення. Продемонстровано переваги MPC для стабілізації перехідних процесів у судових мікромережах при сильному хвилюванні моря, що дозволяє зменшити коливання напруги та частоти, а отже, і додаткові втрати енергії [12].

Останнім часом активно розвиваються метаевристичні алгоритми, такі як генетичні алгоритми (GA), оптимізація роєм частинок (PSO) та новітні біоінспіровані методи, наприклад, алгоритм оптимізації «Coati» (Multi-Objective Coati Optimization Algorithm – MOCOА). Дослідження показують, що MOCOА перевершує традиційні алгоритми (NSGA-II, MOPSO) за швидкістю збіжності та різноманітністю рішень Парето у багатокритеріальних задачах, дозволяючи знизити витрату палива на 16.12 % та викиди на 13.18 % [13].

Незважаючи на значний обсяг досліджень, існує розрив між теоретичними моделями оптимального керування та їх практичною реалізацією. Більшість існуючих моделей мають ключові особливості: вони або занадто спрощені (статичні моделі балансу потужності, які ігнорують перехідні процеси), або надмірно складні для реалізації в бортових контролерах (повні CFD-моделі гідродинаміки).

Недостатньо опрацьованою залишається комплексна постановка задачі, яка б поєднувала підсистему руху судна (із залежністю опору від стану моря), підсистему генерації (із нелійними витратними характеристиками дизелів) та підсистему розподілу енергії в єдиному просторі станів. Більшість робіт розглядають або оптимізацію маршруту, або оптимізацію електростанції окремо. Інтеграція цих задач на основі єдиного критерію оптимальності в рамках концепції «Vessel as a System» є актуальним науковим завданням.

Попри значний прогрес, існуючі підходи мають низку суттєвих обмежень, які потребують вирішення:

– *Ігнорування динаміки перехідних процесів*: більшість оптимізаційних моделей розглядають квазістаціонарні стани, не враховуючи перехідні процеси у дизелях та електричній мережі. Це може призводити до рішень, які є енергетично ефективними на папері, але небезпечними на практиці через ризик знеструмлення.

– *Спрощене моделювання викидів*: часто використовують лінійні залежності викидів від витрати палива, що є некоректним для NO_x . Механізм утворення NO_x нелінійно залежить від навантаження та температури, що вимагає більш складних моделей [14].

– *Недостатнє врахування деградації ESS*: оптимізація часто ігнорує вартість циклу життя батареї, що може призвести до швидкого виходу з ладу дороговартісного акумулятора при агресивному керуванні.

Мета дослідження

Метою даного дослідження є розробка та наукове обґрунтування постановки задачі енергозберігаючого оптимального керування ГДЕУ з врахуванням конструкції сучасних гребних установок та її вирішення в загальному вигляді.

Виклад основного матеріалу дослідження

Розглянемо електричну безколекторну машину постійного струму, магнітне поле якої в активній частині повітряного зазору має один напрямок по всьому периметру осі обертання ротора. Під активною частиною зазору розуміється та його частина, у якій перебувають провідники якоря. Якір – частина машини, у провідниках якої наводиться електрорушійна сила обертання. Магнітне поле електричної машини створюється котушками, площина намотування яких є ортогональною осі обертання ротора. Принцип дії легко пояснюється з позицій класичної теорії магнітного поля. Основними співвідношеннями для опису електричної машини є формули для сили Ампера та електромагнітної індукції Фарадея.

На провідник довжиною L зі струмом I , що знаходиться в магнітному полі з індукцією B діє сила Ампера:

$$\vec{F}_A = B \cdot I \cdot L \cdot \sin(\alpha), \quad (1)$$

де α кут між провідником та лініями магнітної індукції. Якщо цей кут дорівнює 90 градусів, то формула перетворюється на:

$$\vec{F}_A = B \cdot I \cdot L. \quad (2)$$

В машинах змінного струму (АС) крутний момент є результатом взаємодії обертових полів, що також супроводжується гармонічними складовими. Електрична машина постійного струму (DC) позбавлена цих недоліків, що робить її еталоном «тихого» двигуна в спектрі електромагнітних випромінювань та механічних вібрацій. Ця фізична особливість надає їй теоретично ідеальні характеристики для суднового рушія: здатність розвивати колосальний крутний момент на низьких обертах, а також повну відсутність пульсацій магнітного поля та струму, що забезпечує низький рівень вібрацій та акустичних шумів [15]. Ці характеристики є критично важливими для деяких спеціальних типів суден, наприклад, для військово-морського флоту, зокрема для підводних човнів та протичовнових кораблів, оскільки акустична скритність безпосередньо впливає на виживаність та бойову ефективність.

Вважатимемо, що гребна дизель-електрична установка (ГДЕУ) складається з дизеля, електричного генератора, електродвигуна та електричних перетворювачів. Як рушій використовується гвинт з фіксованим кроком. Розглянемо елементи ГДЕУ з позицій теорії динамічних систем, на базі яких складається математична модель установки. Структурна схема ГДЕУ наведена на рис. 1.

Розглянемо задачу енергозберігаючого оптимального керування гребною дизель-електричною установкою. Підвищити енергетичну ефективність ГДЕУ можна завдяки організації оптимального керування передачею енергії від дизеля до гвинта. У даній роботі досліджується постановка задачі оптимального керування ГДЕУ за критерієм втрат енергії.

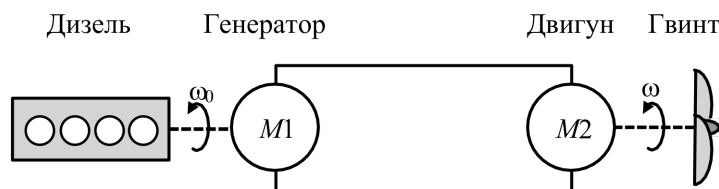


Рис. 1. Структурна схема гребної дизель-електричної установки

Для розв’язання задачі оптимального керування побудована математична модель керованого процесу, яка описує його поведінку протягом часу під впливом керуючих впливів і власного поточного стану. Математична модель передбачає визначення диференціальних рівнянь, що описують можливі способи руху об’єкта керування залежно від стану й керування:

$$pX = f(U(t), X(t)) \quad (3)$$

та визначення обмежень на використання ресурсів у вигляді рівнянь чи нерівностей $x(t_0) = x_0^*$, $x(t_1) = x_1^*$, де pX – похідна за часом вектора змінних стану; $X(t)$ – вектор змінних стану; $U(t)$ – керування; t_0, t_1 – початковий та кінцевий моменти часу.

Оптимальне керування – це задача проектування системи, що забезпечує для заданого об’єкта керування такий закон керування або керуючу послідовність впливів, який забезпечує максимум або мінімум функціоналу якості системи.

$$J = \int_{t_0}^{t_1} F(X(\tau), pX(\tau), \tau) \cdot d\tau. \quad (4)$$

Задача оптимального керування полягає у знаходженні функцій стану $X(t)$ та керування $U(t)$ для часу $(t_0 \leq t \leq t_1)$, які мінімізують функціонал.

Найбільш широко при проектуванні систем керування застосовують такі методи: варіаційне обчислення, принцип максимуму Понтрягіна і динамічне програмування Беллмана [10].

Вирішення задачі оптимального керування в такій постановці для ГДЕУ є проблематичним з таких міркувань:

- немає аналітичного вирішення задачі для нелінійних систем;
- розв’язання задачі навіть для лінійних систем може бути отримане лише чисельними методами і лише для квадратичного критерію якості;
- непрозорість критерію якості;
- складність вирішення лінійної задачі при квадратичному критерії якості, що вимагає застосування чисельних методів.

Враховуючи вищесказане, розв’яжемо задачу оптимального керування ГДЕУ у загальній постановці. Нехай існує динамічна система, що описується системою диференціальних рівнянь:

$$pX = f(U, X_1, X_2), \quad (5)$$

де U – вектор керуючих впливів; $X = X_1 \cup X_2$ – вектор змінних стану; $X_1 \in X$ – вектор із розмірністю вектора U , змінні стану якого доступні для спостереження; $X_2 \in X$ – доповнення вектора X_1 до вектора X .

Методами послідовної корекції сформуємо динаміку системи з бажаними динамічними процесами (рис. 2). Вважатимемо, що перехідна характеристика бажаного динамічного процесу може бути апроксимована експоненційною функцією. Вхідні змінні X_1^0 будуть задавати вихідні змінні X_1 .

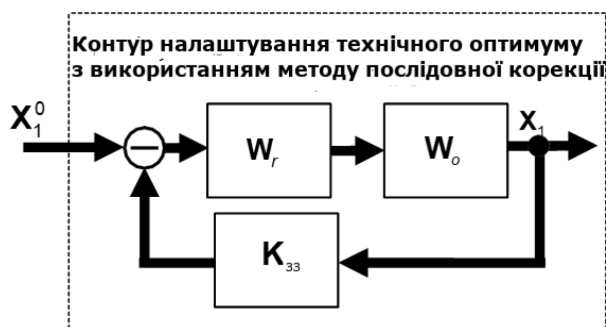


Рис. 2. Контур налаштування технічного оптимуму з використанням методу послідовної корекції:

- W_o – передаточна функція об’єкта керування;
- W_r – передаточна функція регулятора;
- K_{33} – вектор пропорційного зворотного зв’язку

В результаті формування бажаної динамічної поведінки системи початкова система диференціальних рівнянь набуде вигляду:

$$pX = f_0(X_1^0, X_1, X_2), \tag{6}$$

де X_1^0 – вектор нових керуючих впливів, що задають статичні значення змінних стану X_1 . В залежності від виду регуляторів W_r статична помилка

$$\Delta X_1 = X_1^0 - K_{\text{ст}} \cdot X_1 \tag{7}$$

може мати деяке значення або дорівнювати нулю. Навіть при пропорційно-інтегральному регуляторі струму якоря статична помилка може бути неприпустимо великою.

Для реалізації методу оптимального керування створюємо другий контур керування змінними X_1 з інтегральними регуляторами. Другий контур керування дозволить позбутися помилок керуючих та збудуючих впливів.

Вибір параметрів регуляторів може бути виконаний з використанням кореневих методів. Так як перший контур дозволив отримати бажану динамічну поведінку системи, то зв'язок між вхідними сигналами X_1^0 та вихідними сигналами X_1 може бути представлений аперіодичними ланками першого порядку (рис. 3). Рівняння, що описує динамічні процеси, відповідно до структурної схеми матиме вигляд:

$$(x_{\text{opt}}^0 - k_{33} \cdot x) / (T_r \cdot p \cdot (T_1 \cdot p + 1) k_{33}) - x = 0. \tag{8}$$

Йому відповідає характеристичне рівняння:

$$T_r \cdot T_1 \cdot p^2 + T_r \cdot p + 1 = 0. \tag{9}$$

Якщо в цьому рівнянні прийняти $T_r = 2 \cdot T_1$, то рівняння матиме комплексні корені, уявна і дійсна частина будуть рівними. Перехідна характеристика такої системи має перерегулювання 4,3 %, а контур оптимального керування вважається налаштованим на технічний оптимум.

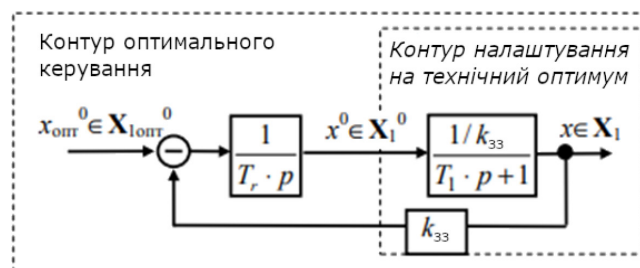


Рис. 3. До вибору постійної часу інтегрального регулятора контурів оптимального керування

В результаті формування бажаної динамічної поведінки в контурах оптимального керування системи система диференціальних рівнянь набуде вигляду:

$$pX = f_{\text{opt}}(X_{1\text{opt}}^0, X_1, X_2), \tag{10}$$

де $X_{1\text{opt}}^0$ – вектор нових керуючих впливів, що задають статичні значення змінних станів X_1 . Статична помилка змінних стану при другому контурі керування з інтегральними регуляторами буде дорівнювати нулю:

$$0 = X_{1\text{opt}}^0 - K_{33} \cdot X_1. \tag{11}$$

Для визначення оптимальних керуючих впливів $X_{1\text{opt}}^0$ повинна бути сформована функція оптимального керування:

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

Припустимо, що задача керування полягає у формуванні заданого значення цільової функції

$$M = f_M(X_{11}), \quad (13)$$

яка є функцією змінних стану $X_{11} \in X_1$. Доповнення вектора X_{11} до вектора X_1 позначимо X_{12} : $X_{11} \cup X_{12} = X_1$. З виразу (15) можна знайти один із елементів вектора X_{11} :

$$x_1 = M \cdot f_M^{-1}(X'_{11}), \quad (14)$$

де X'_{11} – вектор X_{11} без елемента x_1 ; f_M^{-1} – обернена функція до f_M . Використовуючи введені позначення, перепишемо функцію оптимального керування (14) у такому вигляді:

$$\Delta P(M \cdot f_M^{-1}(X'_{11}), X'_{11}, X_{12}, X_2) = \Delta P_M(M, X'_1, X_2), \quad (15)$$

де ΔP_M – функція оптимального керування з урахуванням заданого значення цільової функції M ; X'_1 – вектор X_1 без елемента x_1 . У стаціонарному режимі система рівнянь (13) набуде вигляду:

$$0 = f_{omn}(X_{1omn}^0, X_1, X_2). \quad (16)$$

З цього рівняння з урахуванням відсутності статичної помилки в керуванні виразимо вектор $X_2 = f_2(X_{1omn}^0, X_1)$ і підставимо у вираз цільової функції оптимального керування (17). В результаті отримаємо функцію оптимального керування в наступному вигляді:

$$\Delta P_M(M, X'_1, f_2(X_1)) = \Delta P_A(M, X'_1). \quad (17)$$

Знайдемо мінімум функції оптимального керування у просторі, заданому вектором X'_1 . Для цього виконаємо диференціювання цільової функції. В результаті отримаємо вектор похідних:

$$D\Delta P_A = \frac{\partial \Delta P_A(M, X'_1)}{\partial X'_1}. \quad (18)$$

Припустимо, що існує вектор X'_1 , який перетворює елементи вектора похідних $D\Delta P_A$ в нуль:

$$D\Delta P_A = \frac{\partial \Delta P_A(M, X'_1)}{\partial X'_1} = 0. \quad (19)$$

Тоді в просторі, заданому вектором X'_1 існує оптимальний стан, що мінімізує функцію оптимального керування (19). В цьому випадку вектор керуючих впливів $X_{1omn}^{0'} = X'_1$ і знаходиться шляхом розв'язання рівняння:

$$\frac{\partial \Delta P_A(M, X_{1ir\delta}^{0'})}{\partial X_{1ir\delta}^{0'}} = 0, \quad (20)$$

де $X_{1omn}^{0'}$ – вектор X_{1omn}^0 без елемента x_1^0 . Елемент x_1^0 можна знайти з виразу (16). Розв'язання рівняння дає вектор оптимальних значень керуючих впливів $X_{1omn}^0 = f(M, X_1)$, таким чином, у системі з оптимальним керуванням формується оптимальний регулятор:

$$W_{omn} = \frac{X_{1ir\delta}^{0'}}{f(M, X_1)}. \quad (21)$$

В результаті система оптимального керування набуде вигляду, представленого на рис. 4. На вектор простору станів зазвичай накладаються обмеження. Може бути задана верхня та нижня границі кожної змінної стану системи керування. Якщо таке обмеження задано фізично

або системою керування, то вихідна система рівнянь змінює вигляд. При цьому простір змінних стану звужується, і знаходяться нові значення оптимальних керуючих впливів з використанням описаної вище методології.

Таким чином, запропонований підхід до оптимального керування дозволить знайти та сформулювати керуючі впливи, які в статичному режимі мінімізують функцію оптимального керування ΔP та забезпечують задане значення цільової функції M . Перехід від одного оптимального стану системи до іншого оптимального стану відбувається за бажаними динамічними процесами. При цьому під бажаною динамічною поведінкою розуміються процеси, що відбуваються із заданим перерегулюванням, нульовою статичною помилкою і максимальною швидкодією. Формування таких процесів провадиться відповідним розподілом коренів характеристичного рівняння.

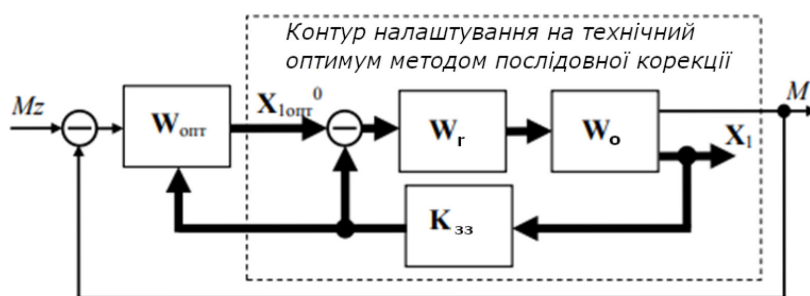


Рис. 4. Система оптимального керування динамічною системою:

- W_o – передаточна функція об’єкту керування;
- W_r – передаточна функція регулятора;
- W_{opt} – передаточна функція оптимального регулятора;
- K_{zz} – вектор пропорційного зворотного зв’язку;
- M_z – задане значення цільової функції M

Висновки

Електричні машини постійного струму відрізняються своєю простотою і високою ефективністю. Вони є перспективними двигунами з постійним крутним моментом, а також генераторами струму і мають наступні основні переваги: низький коефіцієнт ваги на одиницю потужності, тривалий експлуатаційний період обслуговування, високу ефективність, низький рівень шуму. Електричним машинам постійного струму властиві низька напруга та високі робочі струми, що робить забезпечення зв’язку між двигунами й генераторами важко здійсненою задачею. Однак застосування нових технологій у галузі високотемпературних надпровідників і рідкометалевого струмознімання дає змогу створювати машини достатньої потужності, що задовольняють жорстким вимогам для застосування їх у системах електричного руху на судах.

Сучасні конструкції машини постійного струму дають змогу отримати значне зменшення ваги й пульсацій моменту по відношенню до існуючих систем. Ця обставина зумовлює перспективність застосування цих машин у складі ГДЕУ. Дослідження показують, що ГДЕУ, синтезовані на основі машини постійного струму, характеризуються високими показниками надійності та енергоефективності.

Застосування подібних систем електричного руху особливо ефективно для використання на судах спеціального призначення: дослідницьких, суден активного льодового плавання, криголамів та суден військового призначення. Підвищення енергетичної ефективності ГДЕУ може бути досягнуто завдяки застосуванню перспективних видів електричних машин і використання енергоефективного керування.

Оптимізувати енергетичну ефективність ГДЕУ можна за допомогою організації оптимального керування передачею енергії від дизеля до гвинта. Для цього запропоновано спосіб побудови алгоритму оптимального керування за критерієм мінімуму втрат енергії у всіх

елементах ГДЕУ на шляху перетворення. При такому управлінні значення всіх змінних керування підтримуються на такому рівні, щоб забезпечити критерій збереження заданого електромагнітного моменту на гвинті.

Вирішення задачі оптимального керування за критерієм мінімуму втрат енергії дозволить підняти енергоефективність суден на більш високий рівень.

Список використаної літератури

1. IMO. Improving the energy efficiency of ships. URL: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/improving%20the%20energy%20efficiency%20of%20ships.aspx> (дата звернення 26.01.2026).
2. Ammar N. R., Seddiq I. S. Evaluation of the environmental and economic impacts of electric propulsion systems onboard ships: case study passenger vessel. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28(28). P. 37851–37866. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13271-4>
3. Ebrahimi S. Analysis of Data-Driven Modeling of Cycloconverters for Efficient Electromagnetic Transient Simulations of Electrified Ship Propulsion Systems. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering; Telecommunications*. 2024. Vol. 13(6). P. 503–509. <https://doi.org/10.18178/ijeetc.13.6.503-509>
4. Martinić-Cezar S., Jurić Z., Assani N., Lalić B. Optimization of Fuel Consumption by Controlling the Load Distribution between Engines in an LNG Ship Electric Propulsion Plant. *Energies*. 2024. Vol. 17(15), 3718. <https://doi.org/10.3390/en17153718>
5. Jung J., Jeon H., Kim H., Kim S. A Novel Approach for the Systematic Evaluation and Optimization of Performance and Emissions in Hybrid Electric Propulsion Systems. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. Vol. 13(2), 328. <https://doi.org/10.3390/jmse13020328>
6. Mushtaq R., Iqbal M., Khaliq A., Iqbal J. Optimal design of a hybrid ship energy management system under various sea conditions using Model Predictive Control. *PLOS One*. 2025. Vol. 20(7), e0326969. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0326969>
7. Wang X., Shipurkar U., Haseltalab A., Polinder H., Claeys F., Negenborn R. R. Sizing and Control of a Hybrid Ship Propulsion System Using Multi-Objective Double-Layer Optimization. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 72587–72601. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3080195>
8. Hong S. H., Kim D. M., Kim S. J. Power Control Strategy Optimization to Improve Energy Efficiency of the Hybrid Electric Propulsion Ship. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 22534–22545. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3364374>
9. Song C., Guo T., Sui J., Zhang X. Dynamic Positioning Control of Large Ships in Rough Sea Based on an Improved Closed-Loop Gain Shaping Algorithm. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12(2), 351. <https://doi.org/10.3390/jmse12020351>
10. Abbas H., Kim Y., Siegel J. B., Rizzo D. M. Synthesis of Pontryagin's Maximum Principle Analysis for Speed Profile Optimization of All-Electric Vehicles. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2019. Vol. 141(7). <https://doi.org/10.1115/1.4043117>
11. Löffler C., Geertsma R., Mitropoulou D., Polinder H., Coraddu A. Equivalent Consumption Minimization Strategy for Full-Electric Ship Energy Management with Multiple Objectives. *Modelling and Optimisation of Ship Energy Systems*. 2024. <https://doi.org/10.59490/moses.2023.673>
12. Shu H., Li X., Liu Y., Wang R. Model Predictive Control With Disturbance Observer for Marine Diesel Engine Speed Control. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11, P. 49300–49318. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3270286>
13. Sun F., Liu Y., Gan H., Zang S., Lei Z. Multi-Objective Optimization of Energy Storage Configuration and Dispatch in Diesel-Electric Propulsion Ships. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. Vol. 13(9), 1808. <https://doi.org/10.3390/jmse13091808>

14. Tadros M., Boulougouris E. Calibration Procedures for NOx Emissions Model of a High-Speed Marine Diesel Engine Using Optimization Procedures. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. Vol. 13(8), 1585. <https://doi.org/10.3390/jmse13081585>
15. Arish N., Kamper M. J., Wang R. J. Advancements in electrical marine propulsion technologies: A comprehensive overview. *SAIEE Africa Research Journal*. 2025. Vol. 116(1), P. 14–29. <https://doi.org/10.23919/saiee.2025.10755059>

References

1. IMO. Improving the energy efficiency of ships. URL: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/improving%20the%20energy%20efficiency%20of%20ships.aspx> (date of access 26.01.2026)
2. Ammar, N. R., & Seddiek, I. S. (2021). Evaluation of the environmental and economic impacts of electric propulsion systems onboard ships: case study passenger vessel. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(28), 37851–37866. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13271-4> [in English].
3. Ebrahimi, S. (2024). Analysis of Data-Driven Modeling of Cycloconverters for Efficient Electromagnetic Transient Simulations of Electrified Ship Propulsion Systems. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering; Telecommunications*, 13(6), 503–509. <https://doi.org/10.18178/ijeetc.13.6.503-509> [in English].
4. Martinić-Cezar, S., Jurić, Z., Assani, N., & Lalić, B. (2024). Optimization of Fuel Consumption by Controlling the Load Distribution between Engines in an LNG Ship Electric Propulsion Plant. *Energies*, 17(15), 3718. <https://doi.org/10.3390/en17153718> [in English].
5. Jung, J., Jeon, H., Kim, H., & Kim, S. (2025). A Novel Approach for the Systematic Evaluation and Optimization of Performance and Emissions in Hybrid Electric Propulsion Systems. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(2), 328. <https://doi.org/10.3390/jmse13020328> [in English].
6. Mushtaq, R., Iqbal, M., Khaliq, A., & Iqbal, J. (2025). Optimal design of a hybrid ship energy management system under various sea conditions using Model Predictive Control. *PLOS One*, 20(7), e0326969. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0326969> [in English].
7. Wang, X., Shipurkar, U., Haseltalab, A., Polinder, H., Claeys, F., & Negenborn, R. R. (2021). Sizing and Control of a Hybrid Ship Propulsion System Using Multi-Objective Double-Layer Optimization. *IEEE Access*, 9, 72587–72601. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3080195> [in English].
8. Hong, S. H., Kim, D. M., & Kim, S. J. (2024). Power Control Strategy Optimization to Improve Energy Efficiency of the Hybrid Electric Propulsion Ship. *IEEE Access*, 12, 22534–22545. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3364374> [in English].
9. Song, C., Guo, T., Sui, J., & Zhang, X. (2024). Dynamic Positioning Control of Large Ships in Rough Sea Based on an Improved Closed-Loop Gain Shaping Algorithm. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(2), 351. <https://doi.org/10.3390/jmse12020351> [in English].
10. Abbas, H., Kim, Y., Siegel, J. B., & Rizzo, D. M. (2019). Synthesis of Pontryagin's Maximum Principle Analysis for Speed Profile Optimization of All-Electric Vehicles. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 141(7). <https://doi.org/10.1115/1.4043117> [in English].
11. Löffler, C., Geertsma, R., Mitropoulou, D., Polinder, H., & Coraddu, A. (2024). Equivalent Consumption Minimization Strategy for Full-Electric Ship Energy Management with Multiple Objectives. *Modelling and Optimisation of Ship Energy Systems*. <https://doi.org/10.59490/moses.2023.673> [in English].
12. Shu, H., Li, X., Liu, Y., & Wang, R. (2023). Model Predictive Control With Disturbance Observer for Marine Diesel Engine Speed Control. *IEEE Access*, 11, 49300–49318. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3270286> [in English].

13. Sun, F., Liu, Y., Gan, H., Zang, S., & Lei, Z. (2025). Multi-Objective Optimization of Energy Storage Configuration and Dispatch in Diesel-Electric Propulsion Ships. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(9), 1808. <https://doi.org/10.3390/jmse13091808> [in English].
14. Tadros, M., & Boulougouris, E. (2025). Calibration Procedures for NOx Emissions Model of a High-Speed Marine Diesel Engine Using Optimization Procedures. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(8), 1585. <https://doi.org/10.3390/jmse13081585> [in English].
15. Arish, N., Kamper, M. J., & Wang, R. J. (2025). Advancements in electrical marine propulsion technologies: A comprehensive overview. *SAIEE Africa Research Journal*, 116(1), 14–29. <https://doi.org/10.23919/saiee.2025.10755059> [in English].

Самойлов Сергій Олександрович – аспірант кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії. E-mail: samoilovserhii.ksma@gmail.com, ORCID: 0009-0006-4454-0510.

Поливода Владислав Володимирович – к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії. E-mail: polyvodavv@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7742-255X.

Samoilov Serhii Oleksandrovyich – Postgraduate Student at the Department of Ship Electrical Equipment and Automatic Devices Operation of the Kherson State Maritime Academy. E-mail: samoilovserhii.ksma@gmail.com, ORCID: 0009-0006-4454-0510.

Polyvoda Vladyslav Volodymyrovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Ship Electrical Equipment and Automatic Devices Operation of the Kherson State Maritime Academy. E-mail: polyvodavv@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7742-255X.

Дата першого надходження статті до видання: 11.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 01.07.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)