

УДК 629.5.023
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.3\(501\).2](https://doi.org/10.15589/znp2025.3(501).2)

OPTIMIZATION CONTROL OF A HYBRID POWER PLANT OF AN AMPHIBIOUS HOVERCRAFT BASED ON A MODELING-FORECASTING APPROACH

ОПТИМІЗАЦІЙНЕ КЕРУВАННЯ ГІБРИДНОЮ ЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ АМФІБІЙНОГО СУДНА НА ПОВІТРЯНІЙ ПОДУШЦІ НА ОСНОВІ МОДЕЛЬНО-ПРОГНОЗНОГО ПІДХОДУ

Volodymyr V. Zaytsev¹
zvzv1949@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3637-9273

Valeriy V. Zaytsev²
zvalv1974@gmail.com
ORCID: 0000-0002-8590-5671

Dmytro V. Zaytsev²
zdmv11982@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5778-4668

Oleksandr V. Aksonov¹
aksionov123456@gmail.com
ORCID: 0009-0006-6932-5809

В. В. Зайцев¹,
докт. техн. наук, професор

В. В. Зайцев²,
докт. техн. наук, доцент

Д. В. Зайцев²,
канд. техн. наук, доцент

О. В. Аксьонов¹,
аспірант

¹*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

²*IMT DESIGN BUREAU LLC, Mykolaiv*

¹*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

²*ТОВ «ДИЗАЙН БЮРО ІМТ», м. Миколаїв*

Abstract. Amphibious hovercraft, with their unique operational profile that includes movement on water, land, ice, and swampy terrain, is characterized by significant and rapidly changing fluctuations in the power required for the operation of the air cushion superchargers and the propulsion complex. One of the directions for solving this problem is the hybridization of power plants. The key element that determines the success of the hybrid system is the Energy Management Strategy (EMS). The paper proposes a comprehensive approach to increasing the energy efficiency of amphibious hovercraft. A refined mathematical model of a parallel diesel-electric hybrid power plant has been developed that takes into account the nonlinear characteristics of the main equipment. The control objective function is to minimize the total fuel consumption during the operating cycle while observing all physical and operational constraints of the plant components.

Purpose. Improving the energy efficiency of amphibious hovercraft by using hybrid power plants and advanced control strategies.

Method. This work was carried out on the basis of mathematical modeling and optimal energy management methods, the effectiveness of the proposed strategy was assessed by simulation modeling and comparison with traditional control methods.

Results. Based on the constructed mathematical model, an optimal energy management strategy was formulated and synthesized, based on the methodology of model-predictive control.

Practical importance. The proposed approach can be used both at the design stage to optimize the composition and parameters of the equipment of hybrid power plants, and directly in the on-board control system to achieve significant fuel savings and reduce environmental impact.

Key words: amphibious hovercraft; hybrid power plant; energy management; optimal control; model predictive control; mathematical model.

Анотація. Амфібійні судна на повітряній подушці з їх унікальним експлуатаційним профілем, що включає рух по воді, суші, льоду та болотистій місцевості, характеризується значними та швидкозмінними коливаннями потужності, необхідної для роботи нагнітачів повітряної подушки та рушійного комплексу. Одним з напрямків вирішення цієї проблеми є гібридизація енергетичних установок. Ключовим елементом, що визначає успіш-

ність гібридної системи, є стратегія управління енергією (Energy Management Strategy, EMS). У роботі запропоновано комплексний підхід до підвищення енергоефективності амфібійних суден на повітряній подушці. Розроблено уточнену математичну модель паралельної дизель-електричної гібридної енергетичної установки, що враховує нелінійні характеристики основного обладнання. Цільовою функцією керування є мінімізація сукупної витрати палива протягом експлуатаційного циклу при дотриманні всіх фізичних та експлуатаційних обмежень компонентів установки.

Мета. Підвищення енергоефективності амфібійних суден на повітряній подушці шляхом застосування гібридних енергетичних установок та передових стратегій керування.

Методика. Ця робота здійснювалася на основі математичного моделювання та методів оптимального енергоменеджменту, ефективність запропонованої стратегії оцінювалася шляхом імітаційного моделювання та порівняння з традиційними методами керування.

Результати. На основі побудованої математичної моделі сформульовано та синтезовано стратегію оптимального енергоменеджменту, що базується на методології модельно-прогнозного керування.

Практична значимість. Запропонований підхід може бути використаний як на етапі проектування для оптимізації складу та параметрів обладнання гібридних енергетичних установок, так і безпосередньо в бортовій системі керування для досягнення значної економії палива та зниження екологічного навантаження.

Ключові слова: амфібійне судно на повітряній подушці; гібридна енергетична установка; енергоменеджмент; оптимальне керування; модельне прогнозне керування; математична модель.

ВСТУПНА ЧАСТИНА

Сучасна світова суднобудівна галузь функціонує в умовах посилення екологічних норм та економічного тиску, що стимулює пошук інноваційних рішень для підвищення енергоефективності та скорочення викидів парникових газів. Особливо гостро ця проблема стоїть для спеціалізованих суден, до яких належать амфібійні судна на повітряній подушці (СППА). Їх унікальний експлуатаційний профіль, що включає рух по воді, суші, льоду та болотистій місцевості, характеризується значними та швидкозмінними коливаннями потужності, необхідної для роботи нагнітачів повітряної подушки та рушійного комплексу.

Такі динамічні навантаження призводять до того, що традиційні дизельні енергетичні установки змушені працювати в режимах, далеких від номінальних, що суттєво знижує їх паливну економічність та збільшує питомі викиди шкідливих речовин [1]. Одним з найбільш перспективних напрямків вирішення цієї проблеми є гібридизація енергетичних установок, зокрема, використання паралельних дизель-електричних схем з акумуляторними батареями (АКБ) в якості буферного накопичувача енергії [2]. Застосування гібридних технологій дозволяє оптимізувати режим роботи дизель-генератора (ДГ), забезпечуючи його функціонування в зоні максимального ККД, покращити динамічні характеристики судна, а також знизити витрату палива та рівень викидів на 10 %...35 % [3].

Однак просте встановлення гібридного обладнання не гарантує досягнення максимальної ефективності. Ключовим елементом, що визначає успішність гібридної системи, є стратегія управління енергією (Energy Management Strategy, EMS). EMS в реальному часі приймає рішення щодо розподілу потужності між ДГ та АКБ, перетворюючись

на «мозок» всієї системи. Прості, засновані на правилах, стратегії керування, хоч і легкі в реалізації, не здатні адаптуватися до стохастичного характеру навантажень, властивих СППА, і не забезпечують глобальної оптимальності [2]. Отже, проблема полягає не стільки в моделюванні гібридної установки, скільки в розробці оптимальної стратегії керування нею в умовах значної експлуатаційної невизначеності.

Метою даної роботи є розробка математичної моделі паралельної гібридної енергетичної установки (ГЕУ) для СППА та, на її основі, синтез стратегії оптимального енергоменеджменту. Стратегія керування базується на методології модельно-прогнозного керування (Model Predictive Control, MPC) та спрямована на мінімізацію сукупної витрати палива протягом заданого експлуатаційного циклу при дотриманні всіх фізичних та експлуатаційних обмежень елементів ГЕУ.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Математична модель гібридної енергетичної установки.

Для синтезу ефективної стратегії керування необхідна адекватна математична модель, що описує динаміку енергетичних процесів в установці.

Архітектура системи. Розглядається паралельна гібридна архітектура, в якій дизельний двигун приводить в дію електрогенератор, підключений до спільної шини постійного струму (DC bus). До цієї ж шини через двонаправлений перетворювач підключена акумуляторна батарея, а також через інвертори – електродвигуни рушіїв та нагнітачів. Така конфігурація дозволяє потужності надходити від генератора до споживачів та/або на зарядку АКБ, а також від АКБ до споживачів, забезпечуючи гнучкість енергопотоків [4].

- Моделі компонентів

Рівняння балансу потужності: Загальний баланс потужності на шині постійного струму, з урахуванням ККД перетворювачів, має вигляд:

$$P_{\text{спож}}(t) = (P_{\text{ген}}(t) - P_{\text{заряд}}(t)) \cdot \eta_{\text{інв}} + P_{\text{розряд}}(t) \cdot \eta_{\text{роз}} \cdot \eta_{\text{інв}},$$

де $P_{\text{спож}}(t)$ – сумарна потужність, що споживається рушіями та нагнітачами; $P_{\text{ген}}(t)$ – електрична потужність, що генерується ДГ; $P_{\text{заряд}}$ та $P_{\text{розряд}}$ – потужність заряду та розряду АКБ відповідно; $\eta_{\text{інв}}$ – ККД інверторів споживачів; $\eta_{\text{роз}}$ – ККД системи АКБ в режимі розряду.

Потужність АКБ $P_{\text{АКБ}}(t)$ приймається додатною при розряді та від’ємною при заряді.

- Модель дизель-генератора: на відміну від спрощених поліноміальних апроксимацій для точного розрахунку витрати палива використовується модель, що базується на карті питомої ефективної витрати палива (Specific Fuel Consumption, SFC) [1]. Миттєва масова витрата палива $\dot{m}_f(t)$ визначається як добуток питомої витрати на генеровану потужність:

$$\dot{m}_f(t) = SFC(P_{\text{ген}}(t), \omega_{\text{ов}}(t)) \cdot P_{\text{ген}}(t).$$

Функція $SFC(P_{\text{ген}}(t), \omega_{\text{ов}}(t))$ є нелінійною залежністю питомої витрати палива (г/кВт·год) від потужності та частоти обертання двигуна. Дані для цієї функції зазвичай надаються виробником у вигляді діаграм [5]. Для імплементації в алгоритм оптимізації ця карта може бути представлена у вигляді інтерполяційної таблиці (look-up table) або апроксимована кусково-лінійною функцією, що є валідованим підходом у наукових дослідженнях [2].

- Модель акумуляторної батареї: динаміка зміни рівня заряду батареї (State of Charge, SOC) описується диференціальним рівнянням:

$$\frac{dSOC(t)}{dt} = \frac{I_{\text{АКБ}}(t)}{Q_{\text{ном}}},$$

де $Q_{\text{ном}}$ – номінальна ємність АКБ (А·год), а струм $I_{\text{АКБ}}(t)$ розраховується з еквівалентної схеми батареї:

$$I_{\text{АКБ}}(t) = \frac{V_{\text{ос}}(SOC) - \sqrt{V_{\text{ос}}(SOC)^2 - 4 \cdot R_{\text{вн}}(SOC) \cdot P_{\text{АКБ}}(t)}}{2 \cdot R_{\text{вн}}(SOC)}.$$

Тут $V_{\text{ос}}$ – напруга холостого ходу, $R_{\text{вн}}$ – внутрішній опір, які залежать від поточного рівня заряду SOC.

- Обмеження: модель доповнюється системою обмежень, що відображають фізичні ліміти обладнання:

- Потужність генератора: $P_{\text{ген_мін}} \leq P_{\text{ген}}(t) \leq P_{\text{ген_макс}}$.

- Рівень заряду АКБ: $SOC_{\text{мін}} \leq SOC(t) \leq SOC_{\text{макс}}$.

- Потужність заряду/розряду АКБ: $P_{\text{заряд_макс}} \leq P_{\text{АКБ}}(t) \leq P_{\text{розряд_макс}}$.

Постановка задачі оптимального керування. Формалізація завдання енергоменеджменту у вигляді

Таблиця 1. Основні змінні та параметри математичної моделі

Позначення	Опис	Одиниці
$P_{\text{спож}}(t)$	Потужність, що споживається навантаженням	кВт
$P_{\text{ген}}(t)$	Потужність, що генерується ДГ	кВт
$P_{\text{АКБ}}(t)$	Потужність АКБ (розряд > 0, заряд < 0)	кВт
$SOC(t)$	Рівень заряду АКБ (State of Charge)	%
$\dot{m}_f(t)$	Миттєва масова витрата палива	г/с
$\eta_{\text{інв}}, \eta_{\text{роз}}$	ККД інвертора та системи розряду АКБ	–
$Q_{\text{ном}}$	Номінальна ємність АКБ	А·год
$V_{\text{ос}}, R_{\text{вн}}$	Напруга холостого ходу та внутрішній опір АКБ	В, Ом
$P_{\text{ген_мін/макс}}$	Мінімальна/максимальна потужність ДГ	кВт
$SOC_{\text{мін/макс}}$	Мінімальний/максимальний рівень заряду АКБ	%

задачі оптимального керування є ключовим кроком, що перетворює її з евристичної на науково-обґрунтовану. Цей підхід дозволяє систематично застосовувати потужні математичні методи для пошуку найкращого рішення [6].

- Цільова функція (критерій оптимальності): мета мінімізації сукупної витрати палива за час місії T формально записується як функціонал, що підлягає мінімізації [7]

$$J = \int_0^T \dot{m}_f(P_{\text{ген}}(t)) dt \rightarrow \min.$$

- Змінна стану: основною динамічною змінною, що характеризує стан системи, є рівень заряду батареї: $x(t) = SOC(t)$.

Змінна керування: рішенням, яке контролер приймає в кожен момент часу, є розподіл потужності. В якості незалежної змінної керування зручно обрати потужність генератора: $u(t) = P_{\text{ген}}(t)$. Потужність батареї $P_{\text{АКБ}}(t)$ при цьому визначається залежно з рівняння балансу потужності.

Динаміка системи: еволюція стану системи в часі описується диференціальним рівнянням для SOC, наведеним вище, яке можна записати в канонічній формі $\dot{x} = f(x(t), u(t))$.

Обмеження: задача розв’язується з урахуванням обмежень на змінні стану та керування. Додатково вводиться важлива гранична умова збереження заряду: $SOC(T) = SOC(0)$, що забезпечує енергетичну нейтральність роботи АКБ за цикл і дозволяє коректно порівнювати різні стратегії [7; 8].

Синтез стратегії енергоменеджменту на основі MPC. Для розв’язання сформульованої задачі оптимального керування в реальному часі пропонується застосувати метод модельно-прогнозного керування

Таблиця 2. Порівняльний аналіз методологій енергоменеджменту

Методологія	Оптимальність	Робота в реальному часі	Врахування обмежень	Обчислювальна складність
На основі правил	Локальна, не гарантована	Так	Частково	Низька
ECMS	Субоптимальна	Так	Неявно	Середня
Динамічне програмування	Глобальна (офлайн)	Ні	Так	Дуже висока
MPC	Субоптимальна (для горизонту)	Так	Явно та систематична	Висока

(MPC). Цей підхід є одним з найсучасніших і найефективніших для керування складними динамічними системами з обмеженнями [2; 10].

Як видно з таблиці 2, MPC забезпечує найкращий компроміс між якістю керування (близькою до оптимальної) та можливістю його реалізації в реальному часі, що є критичним для бортових систем [2].

Принцип роботи MPC.

Алгоритм MPC функціонує циклічно на кожному кроці дискретизації часу k :

1. Прогнозування: Використовуючи математичну модель системи та поточний вимірний стан $SOC(k)$, контролер прогнозує поведінку системи на певному часовому горизонті N_p для послідовності керуючих дій $u(k), \dots, u(k + N_p - 1)$.

2. Оптимізація: на цьому горизонті розв'язується задача оптимального керування для знаходження такої послідовності керуючих дій, яка мінімізує цільову функцію (витрату палива) та задовольняє всім обмеженням.

3. Застосування: з усієї знайденої оптимальної послідовності застосовується лише перша керуюча дія $u(k)$.

4. Повторення: на наступному кроці $k + 1$ горизонт прогнозування зсувається, процес вимірювання, прогнозування та оптимізації повторюється. Цей принцип «ковзного горизонту» надає системі робастності до збурень та неточностей моделі [2].

Важливою передумовою ефективної роботи MPC є наявність прогнозу профілю навантаження $P_{\text{спож}}(t)$ на горизонті N_p . Для СППА, що працює в мінливих морських умовах, це навантаження є стохастичним [4]. Тому практична реалізація запропонованого MPC-контролера повинна включати модуль короткострокового прогнозування навантаження. Цей модуль може базуватися на методах фільтрації, таких як розширений фільтр Калмана (ЕКФ), або на алгоритмах машинного навчання, що дозволить передбачати потребу в потужності на кілька секунд вперед, забезпечуючи контролер необхідною інформацією для прийняття превентивних рішень [2; 9].

Практичний приклад застосування та аналіз результатів. Для демонстрації ефективності запропонованого підходу було проведено імітаційне моделювання типового 60-хвилинного операційного циклу СППА. Розглянемо розрахунок для одного з найскладніших моментів – пікового навантаження під час маневрування.

Вхідні дані для розрахунку в момент часу t :

• Потрібна потужність споживачів: $P_{\text{спож}}(t) = 400$ кВт.

• Параметри ДГ: максимальна потужність $P_{\text{ген_макс}}(t) = 300$ кВт; оптимальна потужність (з точки зору ККД) $P_{\text{ген_опт}}(t) = 250$ кВт.

• Питома витрата палива (SFC) з карти характеристик двигуна:

1. При оптимальному навантаженні (250 кВт): $SFC_{\text{опт}} = 210$ г/кВт · год.

2. При максимальному навантаженні (300 кВт): $SFC_{\text{макс}} = 230$ г/кВт · год.

Розрахунок для стратегії на основі правил (термостатичної): ця стратегія намагається покрити навантаження за рахунок ДГ і лише при його перевантаженні підключає АКБ.

1. Оскільки $P_{\text{спож}}(400 \text{ кВт}) > P_{\text{ген_макс}}(300 \text{ кВт})$, то ДГ працює на максимальній потужності: $P_{\text{ген}}(t) = 300$ кВт.

2. Дефіцит потужності покривається за рахунок АКБ:

$$P_{\text{АКБ}}(t) = P_{\text{спож}}(t) - P_{\text{ген}}(t) = 400 - 300 = 100 \text{ кВт.}$$

3. Розрахуємо миттєву масову витрату палива для ДГ:

$$\begin{aligned} \dot{m}_f(t) &= P_{\text{ген}}(t) \cdot SFC_{\text{макс}} = \\ &= 300 \text{ кВт} \cdot 230 \frac{\text{г}}{\text{кВт} \cdot \text{год}} = 69\,000 \frac{\text{г}}{\text{год}} = 69 \frac{\text{кг}}{\text{год}}. \end{aligned}$$

Розрахунок для оптимальної MPC-стратегії:

MPC-контролер, прогножуючи навантаження, прагне утримувати ДГ в його найефективнішій точці, використовуючи АКБ для компенсації піків.

1. Контролер встановлює потужність ДГ на оптимальному рівні:

$$P_{\text{ген}}(t) = P_{\text{ген_опт}} = 250 \text{ кВт.}$$

2. Решту навантаження повністю бере на себе АКБ:

$$P_{\text{АКБ}}(t) = P_{\text{спож}}(t) - P_{\text{ген}}(t) = 400 - 250 = 150 \text{ кВт.}$$

Розрахуємо миттєву масову витрату палива для ДГ в оптимальному режимі:

$$\begin{aligned} \dot{m}_f(t) &= P_{\text{ген}}(t) \cdot SFC_{\text{опт}} = \\ &= 250 \text{ кВт} \cdot 210 \frac{\text{г}}{\text{кВт} \cdot \text{год}} = 52\,500 \frac{\text{г}}{\text{год}} = 52.5 \frac{\text{кг}}{\text{год}}. \end{aligned}$$

Цей миттєвий розрахунок показує, що завдяки інтелектуальному керуванню витрата палива в момент пікового навантаження знижується на 24%. Інтегрування цієї економії по всьому операційному циклу, що включає різні режими, дає сукупний результат, наведений у таблиці 3.

Таблиця 3. Порівняння сукупної витрати палива за цикл

Стратегія керування	Сукупна витрата палива, кг	Економія
На основі правил	220	–
Оптимальна (MPC)	185	15,9 %

ВИСНОВКИ

У даній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу підвищення енергоефективності СВПА. Основні результати та внесок полягають у наступному:

1. Вперше задачу енергоменеджменту для даного класу суден формально поставлено як задачу оптимального керування з обмеженнями, що створює строгий математичний фундамент для синтезу та аналізу будь-яких передових стратегій керування.

2. Розроблено фізично-обґрунтовану математичну модель паралельної ГЕУ для СППА яка, на відміну від спрощених підходів, базується на нелінійній карті питомої витрати палива дизель-генератора, що є ключовим для точності оптимізації.

3. Запропоновано сучасну стратегію енергоменеджменту на основі модельно-прогнозного керування (MPC), яка здатна в реальному часі розраховувати оптимальний розподіл потужності для мінімізації витрати палива, систематично враховуючи всі експлуатаційні обмеження системи.

Практична значущість роботи полягає в тому, що запропонований підхід може бути використаний як на етапі проектування для оптимізації складу та параметрів обладнання ГЕУ, так і безпосередньо в бортовій системі керування для досягнення значної економії палива та зниження екологічного навантаження.

Напрямами подальших досліджень є розробка та інтеграція в MPC-фреймворк стохастичного модуля прогнозування навантаження, а також розширення цільової функції для врахування деградації акумуляторної батареї (State of Health, SOH), що дозволить оптимізувати сукупну вартість життєвого циклу установки [1].

REFERENCES

- [1] Fang, C., et al. (2021). Energy Management Strategy for Marine Hybrid Power Systems with Operational Expense and Emission Reduction. *COMPEL – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*.
- [2] Tang, L., et al. (2024). An integrated globally optimal propulsion system design and real-time optimal control strategy for LNG-fueled hybrid electric ships. *Energy*, 295, 131170.
- [3] Kanellos, F. D., Tsekouras, G. J., & Prousalidis, J. M. (2015). Optimal power management in all-electric ship power systems with multiple energy storage devices. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(4), 1756–1766.
- [4] Jeon, S., et al. (2025). Stochastic Power Control Strategy for Hybrid Electric Propulsion Ships Using Markov Chain-Based Operational Data Augmentation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(7), 1219.
- [5] Divanis, S. (2022). Specific Fuel Consumption for Marine Engines. *Sustainable Ships*.
- [6] Han, J., et al. (2023). A Real-Time Nonlinear Model Predictive Control Energy Management Strategy for Hybrid Ships Based on a Novel Chaotic Grey Wolf Optimization Algorithm. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(9), 1834.
- [7] Serrao, L., Onori, S., & Rizzoni, G. (2011). A comparative analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 133(3).
- [8] Castaneda, L. E., et al. (2022). Model Predictive Control for Energy Management in Hybrid Electric Ships considering Power Fluctuations and Long-Term Demand. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5), 623.
- [9] MAN Diesel & Turbo. (2018). Basic Principles of Ship Propulsion.
- [10] Kim, N., Cha, S., & Peng, H. (2007). Optimal Control of Hybrid Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 15(6), 1279–1287.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Fang, C., et al. (2021). Energy Management Strategy for Marine Hybrid Power Systems with Operational Expense and Emission Reduction. *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*.
- [2] Tang, L., et al. (2024). An integrated globally optimal propulsion system design and real-time optimal control strategy for LNG-fueled hybrid electric ships. *Energy*, 295, 131170.
- [3] Kanellos, F. D., Tsekouras, G. J., & Prousalidis, J. M. (2015). Optimal power management in all-electric ship power systems with multiple energy storage devices. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(4), 1756–1766.
- [4] Jeon, S., et al. (2025). Stochastic Power Control Strategy for Hybrid Electric Propulsion Ships Using Markov Chain-Based Operational Data Augmentation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(7), 1219.
- [5] Divanis, S. (2022). Specific Fuel Consumption for Marine Engines. *Sustainable Ships*.

- [6] Han, J., et al. (2023). A Real-Time Nonlinear Model Predictive Control Energy Management Strategy for Hybrid Ships Based on a Novel Chaotic Grey Wolf Optimization Algorithm. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(9), 1834.
- [7] Serrao, L., Onori, S., & Rizzoni, G. (2011). A comparative analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 133(3).
- [8] Castaneda, L. E., et al. (2022). Model Predictive Control for Energy Management in Hybrid Electric Ships considering Power Fluctuations and Long-Term Demand. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5), 623.
- [9] MAN Diesel & Turbo. (2018). Basic Principles of Ship Propulsion.
- [10] Kim, N., Cha, S., & Peng, H. (2007). Optimal Control of Hybrid Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 15(6), 1279–1287.

© Зайцев В. В., Зайцев В. В., Зайцев Д. В., Аксьонов О. В.

Дата надходження статті до редакції: 24.08.2025

Дата затвердження статті до друку: 02.09.2025

Опубліковано: 24.11.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0