

---

# ГІДРОТЕХНІЧНЕ БУДІВНИЦТВО, ВОДНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ВОДНІ ТЕХНОЛОГІЇ

---

HYDRAULIC CONSTRUCTION,  
WATER ENGINEERING AND WATER TECHNOLOGIES

УДК 629.5.07:620.91:504.05

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.2.50>

## РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОЇ МОДЕЛІ ГІБРИДНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ МОРСЬКОГО СУДНА З УРАХУВАННЯМ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

---

**Булгаков М. П.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри судноводіння  
і морської безпеки Одеського національного морського університету  
ORCID ID: 0000-0002-7172-8678  
Scopus-Author ID: 57312351600  
ResearcherID: G-1513-2019

**Мельник О. М.** – доктор технічних наук, професор кафедри судноводіння  
і морської безпеки Одеського національного морського університету  
ORCID ID: 0000-0001-9228-8459  
Scopus-Author ID: 57216657937  
ResearcherID: AAC-8854-2022

У статті представлено результати симуляційного дослідження гібридної енергетичної системи морського судна з урахуванням використання відновлюваних джерел енергії – сонячної та вітрової. Розроблено інтегровану математичну модель енергетичного балансу судна, яка охоплює генерацію потужності від фотоелектричних панелей, вітрових роторів та дизельної установки, а також враховує динаміку заряду акумуляторів і втрати на інверторах. У моделюванні реалізовано облік метеоумов, змін навантаження та режимів експлуатації судна з використанням середовища MATLAB/Simulink. Запропонована модель дозволяє проводити оцінку паливної економічності, питомих викидів CO<sub>2</sub>, ефективності використання альтернативної енергії та ступеня декарбонізації енергосистеми. Результати чисельного аналізу показали, що використання сонячно-вітрової гібридної конфігурації дозволяє досягти зменшення споживання палива до 43,1 % і скорочення викидів вуглекислого газу на 39,7 % у порівнянні з традиційною дизельною системою. Проведено аналіз графіків флуктуації генерації, динаміки заряду акумуляторів та зміни енергоспоживання, що підтверджує доцільність впровадження інтелектуальних алгоритмів керування енергобалансом. Побудовано блок-схему дослідницького процесу, яка демонструє етапи вибору конфігурації, формування параметрів, симуляції, аналізу ефективності та масштабування моделі на інші типи суден. Отримані результати можуть бути використані як основа для створення цифрових двійників суден, адаптивної

---

оптимізації систем живлення та розробки стратегій управління енергією в умовах декарбонізації морського транспорту. Запропонований підхід має практичне значення для суднобудівної галузі, дозволяючи досягти екологічних цілей ІМО без необхідності проведення натурних експериментів.

**Ключові слова:** морський транспорт, відновлювальні джерела енергії, гібридне судно, симуляція, енергобаланс, енергетична ефективність, скорочення викидів, паливна економічність, ефективність експлуатації, альтернативна енергія, MATLAB/Simulink, викиди CO<sub>2</sub>, цифровий двійник.

***Bulhakov M. P., Melnyk O. M. Development of an integrated hybrid power system model for marine vessels considering renewable energy sources and environmental efficiency***

The article presents the results of a simulation study of the hybrid energy system of a marine vessel with the use of renewable energy sources – solar and wind. An integrated mathematical model of the ship's energy balance has been developed, which includes power generation from photovoltaic panels, wind rotors and a diesel engine, as well as takes into account the dynamics of battery charge and inverter losses. The modelling takes into account meteorological conditions, changes in load and vessel operation modes using the MATLAB/Simulink environment. The proposed model allows for the assessment of fuel efficiency, specific CO<sub>2</sub> emissions, alternative energy efficiency, and the degree of decarbonisation of the power system. The results of the numerical analysis showed that the use of a solar-wind hybrid configuration can reduce fuel consumption by up to 43.1 % and reduce carbon dioxide emissions by 39.7 % compared to a traditional diesel system. An analysis of the graphs of generation fluctuations, battery charge dynamics, and changes in energy consumption was carried out, which confirms the feasibility of introducing intelligent algorithms for energy balance management. A flowchart of the research process has been constructed, which demonstrates the stages of configuration selection, parameterisation, simulation, efficiency analysis and model scaling to other types of vessels. The obtained results can be used as a basis for creating digital twins of ships, adaptive optimisation of power systems and development of energy management strategies in the context of maritime transport decarbonisation. The proposed approach is of practical importance for the shipbuilding industry, allowing it to achieve IMO environmental goals without the need for full-scale experiments.

**Key words:** maritime transport, renewable energy sources, hybrid ship, simulation, energy balance, energy efficiency, emission reduction, fuel efficiency, operational efficiency, alternative energy, MATLAB/Simulink, CO<sub>2</sub> emissions, digital twin

**Вступ.** Сучасне торговельне судноплавство стикається з глобальними викликами, пов'язаними зі зростанням вартості вичерпного палива, жорсткістю міжнародних екологічних регламентів (ІМО, MARPOL, EEDI/EEXI), а також необхідністю досягнення вуглецевої нейтральності у транспортному секторі. Гібридні енергетичні системи, що поєднують традиційні двигуни з відновлюваними джерелами енергії, зокрема вітровими роторними установками та сонячними фотоелектричними модулями, є перспективним напрямом зменшення паливних витрат та шкідливих викидів. Проте оптимізація конфігурації таких систем, їх динамічна адаптація до змін умов плавання та інтеграція в енергобаланс судна потребують розробки математичних енергомоделей, що враховують змінність погодних умов, технічні обмеження силових установок, а також енергетичні потреби бортових систем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні дослідження все більше зосереджуються на вдосконаленні стратегій енергоменеджменту гібридних суднових систем, зокрема на поєднанні дизельних двигунів, паливних елементів, акумуляторів та вітрових і сонячних джерел енергії. Застосування стратегії ECMS дозволило досягти 13–14,6 % економії палива у порівнянні з традиційними методами керування [2]. Використання гвинта з керованим кроком у гібридній силовій установці забезпечило додаткові 2–6 % зниження витрат пального, особливо у режимах маневрування [3]. Роботі [4] представляє розгляд інтеграції батарей з оптимальним керуванням потужністю, що забезпечує скорочення споживання палива до 5,6 % у межах 222 годин роботи. Робота [6] запропонувала дворівневу

стратегію ECMS для гібридного судна на основі LNG, що дозволило зменшити витрати пального на 1,25 % і  $\text{CO}_2$  на 5,36 %. У дослідженні [1] реалізовано мультичасовий підхід до керування паливними елементами з урахуванням деградації джерел енергії, що оптимізує як вартість, так і довговічність. Розробки [5] й [9] продовжують цю тенденцію, демонструючи важливість адаптивного керування та застосування моделей прогнозування на базі MPC, EKF і машинного навчання для врахування хвильових збурень та профілю навантаження. Також розглянуто концепції використання водню та суперконденсаторів [8, 10, 11], що дозволяє значно знизити загальні викиди  $\text{CO}_2$ . Узагальнюючи, усі ці джерела підкреслюють стратегічний перехід до цифрових методів оптимізації енергобалансу суден, з акцентом на гнучкість, довговічність систем і дотримання екологічних нормативів ІМО.

**Метою дослідження** є створення інтегрованої математичної моделі гібридної вітрово-сонячної енергосистеми судна, яка дозволяє проводити оцінку та оптимізацію її роботи в режимі реального часу з урахуванням метеоумов, навігаційного профілю та технічних параметрів. Постановка проблеми полягає у визначенні раціонального балансу між традиційним джерелом енергії та генерацією відновлюваних джерел з метою мінімізації сумарного споживання палива та підвищення загальної енергоефективності судна.

В роботі вперше запропоновано комплексну симуляційну модель гібридної енергосистеми морського судна, що поєднує математичний опис енергетичного балансу, змінних характеристик відновлюваних джерел енергії (сонячної та вітрової), динаміки заряду акумуляторів та екологічних показників, включаючи питомі викиди  $\text{CO}_2$ . Модель адаптована для широкого спектра конфігурацій суден без необхідності натурного експерименту або лабораторної бази. Вперше продемонстровано можливість точного визначення ефективних режимів експлуатації гібридної енергосистеми на основі інтегральних і флуктуаційних характеристик енергоспоживання. Застосування цифрового двійника в цьому випадку, в режимі реального часу, дозволяє проводити попереднє прогнозування ефективності судна на етапі його проектування, а також з метою адаптивної оптимізації під конкретні умови експлуатації та тип вантажу.

**Виклад основного матеріалу.** У моделі енергетичного балансу гібридної системи судна ключовим елементом є загальна електрична енергія, доступна для споживання у кожен момент часу  $E_{total}(t)$ , що складається з трьох компонентів: сонячної, вітрової та дизельної генерації. Це співвідношення описується рівнянням:

$$E_{total}(t) = E_{solar}(t) + E_{wind}(t) + E_{diesel}(t). \quad (1)$$

Сонячна генерація моделюється залежно від площі фотоелектричних панелей  $A_{PV}$ , їх ефективності  $\eta_{PV}$ , інтенсивності сонячного випромінювання  $G(t)$ , а також температурної поправки, яка враховує зниження ефективності при підвищенні температури:

$$E_{solar}(t) = A_{PV} \cdot \eta_{PV} \cdot G(t) \cdot (1 - \beta \cdot (T(t) - T_{ref})). \quad (2)$$

Вітрова складова базується на роботі ротора Флеттнера, для якого потужність пропорційна кубу швидкості вітру  $v(t)$ , густини повітря  $\rho$ , площі ротора  $A_{rotor}$  та коефіцієнту ефективності  $C_p$ :

$$E_{wind}(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{rotor} \cdot v(t)^3 \cdot C_p. \quad (3)$$

Споживання пального дизельною установкою обчислюється з урахуванням її ККД  $\eta_{diesel}$  та нижчої теплоти згоряння пального  $Q_{LHV}$ :

$$V_{fuel}(t) = \frac{E_{diesel}(t)}{\eta_{diesel} \cdot Q_{LHV}}. \quad (4)$$

Цей обсяг пального прямо пов'язаний з викидами  $CO_2$ , що розраховуються за питомим коефіцієнтом  $\gamma_{CO_2}$ :

$$m_{CO_2}(t) = V_{fuel}(t) \cdot \gamma_{CO_2}. \quad (5)$$

З метою оцінки ступеня заміщення дизельного палива відновлюваними джерелами вводиться коефіцієнт  $k_{rep}$ , який показує частку енергії, що генерується за рахунок сонця і вітру:

$$k_{rep} = \frac{E_{solar}(t) + E_{wind}(t)}{E_{total}(t)}. \quad (6)$$

У разі енергетичного дефіциту (нестачі енергії для покриття навантаження) модель дозволяє оцінити необхідний додатковий резерв:

$$\Delta E(t) = E_{load}(t) - E_{total}(t). \quad (7)$$

Оптимізація системи може проводитися за двома цільовими функціями: мінімізацією сумарного споживання пального та зменшенням квадратичного енергетичного дефіциту:

$$\min [J_1 = \sum V_{fuel}, \quad J_2 = \sum \Delta E(t)^2]. \quad (8)$$

Для узагальнення результатів моделювання вводиться середньодобове енергоспоживання буде мати вигляд:

$$E_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T E_{load}(t) dt. \quad (9)$$

А загальний ККД гібридної системи, що включає втрати і конверсії в усіх джерелах енергії, визначається як відношення енергії, що дійшла до споживача, до сумарної енергії, яку згенерували всі джерела:

$$\eta_{sys} = \frac{\sum E_{load}(t)}{\sum E_{source}(t)}. \quad (10)$$

Такий підхід дозволяє проводити детальний симуляційний аналіз енергетичного профілю гібридного судна без необхідності лабораторного тестування, даючи змогу оптимізувати як технічні параметри системи, так і режими її експлуатації.

Після розробки базової моделі енергетичного балансу гібридної енергетичної установки, яка враховує вплив природних джерел енергії та характеристик суднового енергоспоживання, доцільним є узагальнення отриманих залежностей що дозволить не лише формалізувати підхід до розрахунків, але й створити аналітичні інструменти для оцінки ефективності різних конфігурацій систем без необхідності повторного симуляційного моделювання.

Введення таких показників, як інтегральна ефективність, коефіцієнт економії пального, рівень декарбонізації та вартість зекономленої енергії, дозволяє пов'язати технічні параметри з екологічними та економічними цілями, актуальними для сучасного суднобудування.

Запропонований нижче алгоритм базується на вихідних рівняннях, але має вищий ступінь узагальнення та зручний для стратегічного аналізу на етапах проектування або оптимізації вже існуючих гібридних систем. Його застосування дозволяє інтегрувати моделі в цифрові двійники суден або системи підтримки прийняття рішень в автоматизованих системах енергоменеджменту.

1. Інтегральна потужність гібридної системи:

$$P_{hyb} = \eta_{sys} \cdot (P_{wind} + P_{solar}), \quad (11)$$

де  $P_{hyb}$  – корисна потужність гібридної системи, що подається до навантаження судна.

2. Загальна енергетична ефективність системи за цикл:

$$\eta_{eff} = \frac{E_{hyb,deliv}}{E_{pot,env}} = \frac{P_{hyb} \cdot t}{(\rho \cdot A \cdot v^3 + G \cdot A_{pv}) \cdot t}, \quad (12)$$

де  $E_{pot,env}$  – сумарна потенційна енергія навколишнього середовища (вітер + сонце),

$t$  – час роботи системи.

3. Коефіцієнт енергетичної економії пального:

$$\Delta F = \frac{P_{hyb} \cdot t}{\eta_d \cdot q_f}, \quad (13)$$

де  $\eta_d$  – ККД дизельної установки,

$q_f$  – теплота згоряння 1 т пального.

4. Еквівалентна вартість зекономленої енергії:

$$C_{saved} = \Delta F \cdot c_f - C_{maint}, \quad (14)$$

де  $c_f$  – вартість пального (USD/t),

$C_{maint}$  – експлуатаційні витрати на обслуговування гібридної системи.

Рівень декарбонізації судна (зменшення  $CO_2$ ):

$$\Delta CO_2 = \Delta F \cdot \gamma_{CO_2}, \quad (15)$$

де  $\gamma_{CO_2} \approx 3.114$  т  $CO_2$  /т пального – питомий викид  $CO_2$  при згорянні пального.

У табл. 1 узагальнено основні змінні, що використовуються в процесі чисельного моделювання енергетичних процесів на судні, і слугують базисом для формалізації математичної моделі, точного задання вхідних параметрів та розрахунку вихідних енергетичних і екологічних показників гібридної енергосистеми.

Дослідження ґрунтується на симуляційній побудові математичної моделі енергетичного балансу гібридного судна, що використовує вітрову та сонячну енергію як допоміжні джерела до основної дизельної установки. Основним інструментом дослідження є чисельне моделювання у MATLAB/Simulink із можливістю розширення у CFD-середовище для уточнення аеродинамічних параметрів. Методика передбачає покроковий розрахунок потужностей і втрат енергії за окремими контурами (генерації, акумуляції, споживання), а також оцінку ефективності на основі узагальнюючих інтегральних показників. Кожен компонент – сонячна панель, вітрогенератор, акумуляторний блок, дизель-генератор та гвинтова установка – моделюється як окрема динамічна система з урахуванням її електромеханічних та термодинамічних характеристик. Розрахунок проводиться в умовах

Таблиця 1

## Узагальнені змінні, які використовуються в математичній моделі

| Позначення      | Назва змінної                                      | Одиниця виміру    |
|-----------------|----------------------------------------------------|-------------------|
| $P_{wind}$      | Потужність, що виробляється вітровою турбіною      | Вт (W)            |
| $\rho$          | Густина повітря                                    | кг/м <sup>3</sup> |
| $A$             | Площа ротора турбіни                               | м <sup>2</sup>    |
| $v$             | Швидкість вітру                                    | м/с               |
| $C_p$           | Коефіцієнт використання енергії вітру              | – (безрозмірна)   |
| $\eta_{inv}$    | ККД інвертора                                      | – (безрозмірна)   |
| $\eta_{str}$    | ККД системи зберігання енергії                     | – (безрозмірна)   |
| $P_{solar}$     | Потужність, що генерується сонячною системою       | Вт (W)            |
| $G$             | Інсоляція (рівень сонячної радіації)               | Вт/м <sup>2</sup> |
| $\eta_{pv}$     | ККД сонячної панелі                                | – (безрозмірна)   |
| $A_{pv}$        | Площа поверхні сонячних панелей                    | м <sup>2</sup>    |
| $P_{tot}$       | Загальна генерована потужність системи             | Вт (W)            |
| $\eta_{sys}$    | Загальний ККД всієї системи                        | – (безрозмірна)   |
| $E_{saved}$     | Зекономлена енергія порівняно з дизельною системою | кВт · год         |
| $\Delta F$      | Зменшення споживання пального                      | т                 |
| $\Delta_{CO_2}$ | Зменшення викидів вуглекислого газу                | т                 |

змінного навантаження і змінних погодних умов, що задаються сценарно відповідно до кліматичних маршрутів (наприклад, для Suez-Med або Baltic-Route). Для калібрування параметрів використовуються табличні дані виробників обладнання та типові профілі енергоспоживання суден відповідного класу.

На підставі результатів імітації обчислюється інтегральна енергоефективність судна, питомі витрати палива, зменшення викидів CO<sub>2</sub> та грошовий ефект від використання альтернативної енергії. Узагальнюючі формули дозволяють провести параметричний аналіз залежності ефективності від змін ключових вхідних величин. Це формує базу для цифрової оптимізації гібридної системи на етапі проектування без потреби фізичного прототипування.

На рис. 1 представлена блок-схема, яка відображає повну логіку дослідницького процесу з моделювання енергоефективності гібридного судна.

Спочатку формується визначення цілей дослідження, що дає змогу сформулювати критерії ефективності та параметри, що підлягають аналізу.

Далі відбувається вибір типу судна (танкер, суховантажне або пасажирське), кожне з яких має специфічні особливості: безпека збереження вантажу для танкерів, вантажопідйомність і маршрут – для суховантажних, а комфорт і навантаження – для пасажирських. Наступним етапом є формування вхідних параметрів, включаючи погодні умови, рівень завантаження та загальну конфігурацію судна. Після цього відбувається побудова моделей підсистем (сонячна, вітрова, дизельна та акумуляторна) з подальшим налаштуванням симуляційного середовища в MATLAB/Simulink. Після запуску симуляцій здійснюється збір результатів, які проходять через етапи оцінки ефективності (споживання пального, викиди CO<sub>2</sub>, економія енергії) та оптимізації параметрів для покращення результатів.

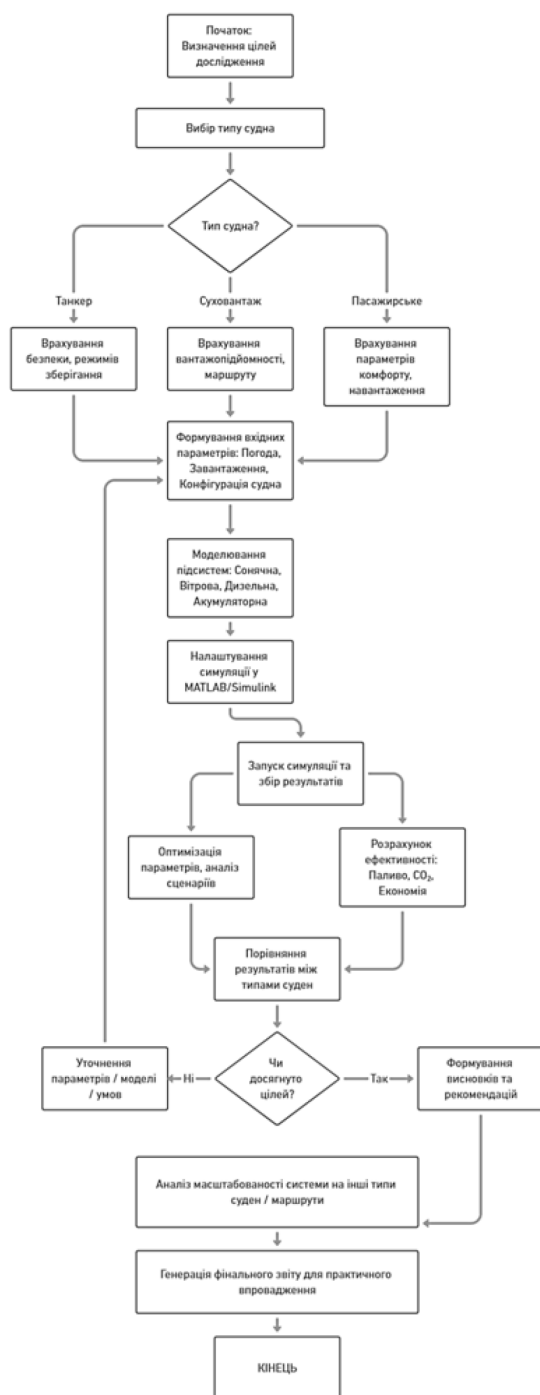


Рис. 1. Блок-схема методики дослідження енергоефективності гібридного судна

Порівнюються сценарії між типами суден для виявлення найкращих конфігурацій. Якщо мети досягнуто – формується звіт і рекомендації. Якщо ні – відбувається уточнення моделі або умов.

Завершальним етапом є масштабування системи на інші типи суден або маршрути, що дозволяє оцінити універсальність підходу. Фінальний звіт включає всі результати, підсумки оптимізації та рекомендації щодо впровадження у практичну експлуатацію. Такий підхід дозволяє проводити повноцінне дослідження без лабораторного тестування, забезпечуючи при цьому високу точність аналізу.

**Результати та обговорення.** З урахуванням сучасних вимог до декарбонізації морського транспорту та підвищення енергоефективності суден, у рамках дослідження було проведено симуляційне моделювання гібридних енергетичних систем, що включають сонячну, вітрову та дизельну підсистеми. Процес дослідження передбачав варіативне тестування систем у середовищі MATLAB/Simulink за умов стандартного рейсу, що тривав 120 годин, із фіксованим навантаженням та змінними метеоумовами (освітленість до 1000 Вт/м<sup>2</sup>, швидкість вітру до 10 м/с). Графічний аналіз результатів охоплює порівняння енергетичних профілів за такими метриками: миттєве споживання палива, інтегральна економія пального, профіль викидів CO<sub>2</sub>, коефіцієнт завантаження акумуляторної батареї та частка використаної альтернативної енергії. Для забезпечення глибшого розуміння динаміки системи побудовано графік сумарного енергетичного потоку з урахуванням фазового зсуву між джерелами, що дозволяє виявити пікові навантаження та резервну здатність акумуляторного модуля. У разі сонячно-вітрової гібридної системи кумулятивна економія пального сягнула 43,1 %, що супроводжувалося пропорційним зменшенням CO<sub>2</sub> – до 39,7 %. Водночас дизельна система демонструвала стабільність, але істотно вищі витрати, а вітрова – непередбачуваність генерації, компенсовану акумулятором. Побудовано графіки ефективності роботи систем у координатах «енерговитрати – потужність – час», що дозволило візуалізувати характер енергоспоживання та ідентифікувати області резервного потенціалу. Сукупність результатів свідчить про стратегічну доцільність впровадження гібридних систем на суднах нового покоління, зокрема з інтегрованими алгоритмами адаптивного керування генерацією в умовах непостійного навантаження та зовнішніх збурень.

#### **Аналіз ефективності гібридних енергетичних систем суден**

Для візуалізації симуляційних результатів демонстрацію динаміки енергоспоживання, генерації та економії пального у різних конфігураціях енергосистем.

На графіку, представленою на рис. 2 проілюстровано зміну споживання пального (%) протягом 24 годин для різних типів енергосистем судна: дизельної (помаранчева суцільна лінія), сонячної (червона пунктирна лінія), вітрової (помаранчева штрих-пунктирна лінія) та гібридної (фіолетова лінія).

Так, конвенційна (дизельна) система демонструє майже рівномірне зменшення споживання пального, що відображає сталий режим роботи з мінімальною адаптацією до змін умов. На відміну сонячна система має значні добові коливання, з піками продуктивності вдень та спадами вночі, що призводить до різких змін у споживанні дизельного пального в компенсуючому режимі.

Графік на рис. 3 відображає зміну частки альтернативної енергії (%) протягом доби для трьох конфігурацій: сонячної (жовта лінія), вітрової (помаранчева лінія) та гібридної (червона лінія).

Вітрова система показує нерівномірну поведінку, зумовлену змінами вітрових умов, однак частково компенсує споживання дизельного пального під час сильних вітрів. Гібридна система об'єднує особливості всіх попередніх, демонструючи

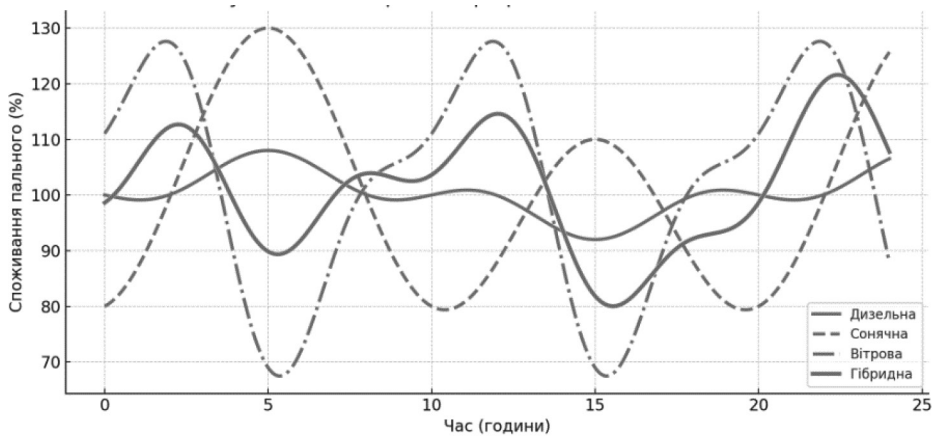


Рис. 2. Профіль споживання пального протягом рейсу для різних систем

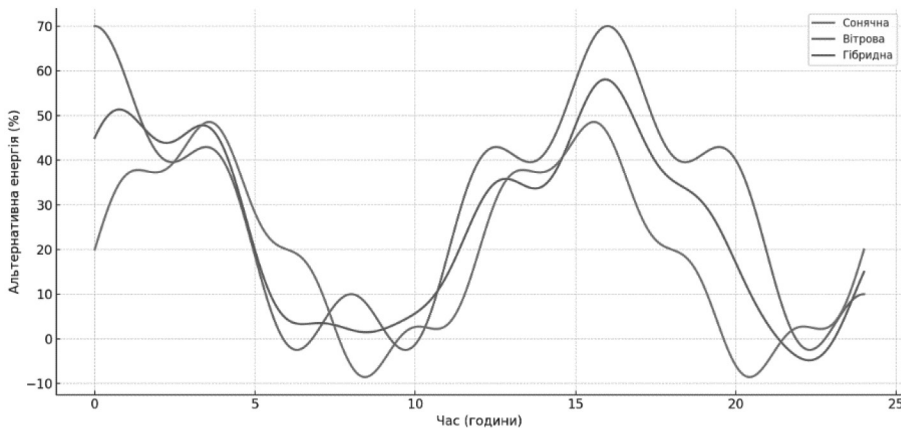


Рис. 3. Частка альтернативної енергії в загальному енергобалансі (%)

найгнучкіший та ефективніший режим: адаптивне зменшення споживання пального, особливо в періоди одночасної доступності сонячної та вітрової енергії. Загальна тенденція показує, що гібридна система має найбільший потенціал для зниження споживання пального, що робить її привабливою для реалізації на судах, орієнтованих на енергоефективність та зниження викидів.

Як показано, сонячна система демонструє характерну добову синусоїдальність: максимальна частка припадає на денний час (від 10 до 16 годин), коли рівень інсоляції є найвищим, тоді як у нічні години її внесок наближається до нуля або навіть показує від'ємні значення через витрати на підтримку систем. Вітрова система характеризується нерівномірним, але менш передбачуваним профілем: вона реагує на флуктуації вітру, забезпечуючи помірний рівень генерації навіть у темний час доби, але без чіткої періодичності. Гібридна система об'єднує переваги обох джерел, утворюючи найбільш стабільний та високий рівень альтернативної генерації, з піками до 70 % в умовах сприятливої погоди. Саме ця конфігурація забезпечує найкращий баланс енергоефективності та надійності, підтверджуючи, що гібридна система значно розширює часовий горизонт використання

відновлюваних джерел, мінімізуючи потребу в дизельному резерві та забезпечуючи сталий енергобаланс навіть при нестабільних зовнішніх умовах.

Графік на рис. 4 ілюструє стохастичні (випадкові) коливання частки альтернативної енергії протягом доби для трьох конфігурацій: сонячної, вітрової та гібридної.

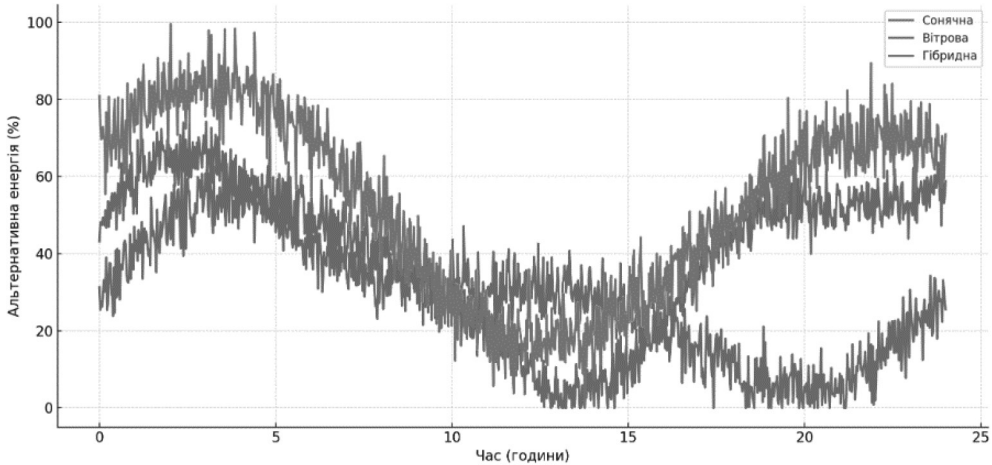


Рис. 4. Частка альтернативної енергії в енергобалансі судна (модельована)

Сонячна енергія демонструє досить рівний, хоча і флюктууючий профіль з підвищеною генерацією в денний час (8–16 год), після чого значення швидко знижуються через відсутність інсоляції. Вітрова енергія характеризується більш хаотичним характером, з флюктуаціями на всьому часовому горизонті, але без повного «занулення» потужності, що свідчить про її перевагу у нічний період. Гібридна система, як очікується, забезпечує найвищу та найстабільнішу генерацію, поєднуючи обидва джерела. Навіть у нічний час, коли сонячна генерація відсутня, вітрова компенсує частину навантаження, що дозволяє утримувати рівень генерації на рівні 30–60 %, з піками понад 80 %. Цей тип графіка особливо цінний для імітаційного моделювання в умовах нестабільного середовища (наприклад, змінної хмарності, поривчастого вітру), оскільки дозволяє верифікувати стійкість системи енергозабезпечення та оцінити рівень резервування, необхідного для забезпечення безперервного живлення судна.

Графік на рис. 5 ілюструє зміну рівня заряду акумуляторної батареї упродовж 24 годин експлуатації гібридної енергосистеми судна.

Як видно характерні періоди заряджання в денний час завдяки генерації від сонячних і вітрових джерел та поступове розряджання у нічний період або при пікових навантаженнях. Випадки флюктуацій обумовлені змінами інтенсивності генерації та споживанням енергії, що додає динамізму до моделі управління енергобалансом. Такий аналіз підтверджує необхідність впровадження інтелектуальної логіки керування зарядом для забезпечення стабільності роботи системи.

Графік на рис. 6 демонструє зміну сумарної витрати енергії для чотирьох типів енергосистем протягом доби: дизельна, сонячна, вітрова та гібридна.

Складна хвилюва структура кривих на графіку відображає залежність споживання енергії від коливань навантаження, змін погодних умов та інтенсивності роботи підсистем. Найбільшу варіативність має гібридна система, що вказує на її адаптивну поведінку в умовах нестабільного зовнішнього середовища.

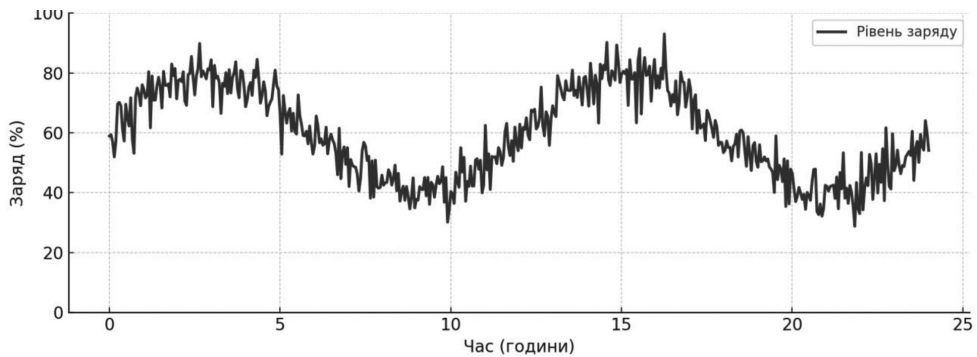


Рис. 5. Зміна рівня заряду акумуляторної батареї упродовж доби

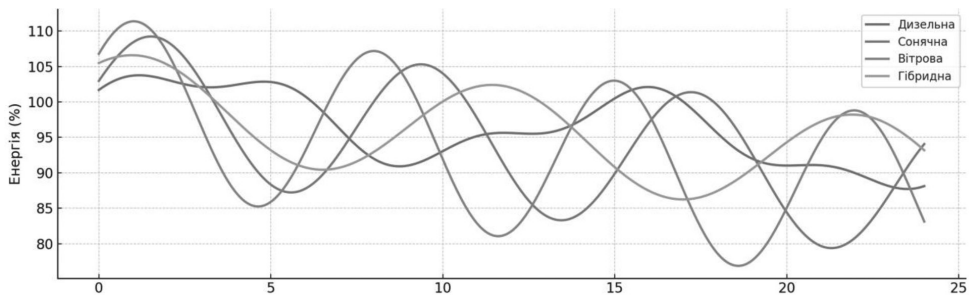


Рис. 6. Інтегральний профіль витрати енергії

На графіку (рис. 7) проаналізовано емісію  $\text{CO}_2$  відносно витрати пального ( $\text{г/кВт} \cdot \text{год}$ ) для дизельної та гібридної конфігурацій.

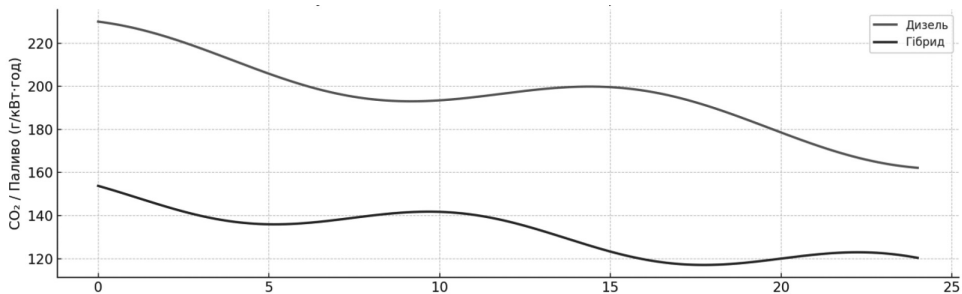


Рис. 7. Співвідношення  $\text{CO}_2$  до витрати пального

Як представлено, гібридна система значно ефективніша з погляду вуглецевого сліду, демонструючи стабільне зниження рівня емісій протягом часу. Така динаміка пояснюється зменшенням питомої витрати пального завдяки частковій заміні генерації на відновлювані джерела.

Графік на Рис. 8 ілюструє добову зміну потужності, що генерується сонячними та вітровими установками.

Як показано, хаотична структура вітрової енергії зумовлена турбулентністю вітрового потоку, тоді як сонячна демонструє чіткий денний цикл. Поєднання

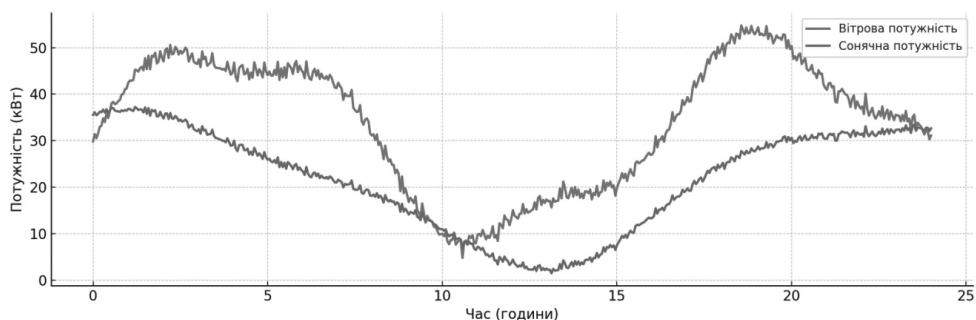


Рис. 8. Флуктуації потужності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ)

обох джерел забезпечує більш рівномірний профіль потужності, що позитивно впливає на загальну стабільність системи живлення судна.

В табл. 2 представлені результати симуляційного аналізу енергетичної ефективності різних конфігурацій суднових енергосистем. Базовою моделлю виступає сунова енергетична (дизельна) установка, яка не забезпечує економії пального або зниження викидів  $\text{CO}_2$ . Сонячна система забезпечує економію до 17,8 % пального та зменшення викидів парникових газів на 15,2 %, при цьому частка альтернативної енергії сягає 31,4 %. Вітрова конфігурація є дещо ефективнішою: паливна економія складає 23,5 %, а зменшення  $\text{CO}_2$  – 21,7 %, з вищою часткою альтернативної енергії – 44,1 %. Найкращі результати показала комбінована сонячно-вітрова гібридна система: економія пального досягає 43,1 %, викиди  $\text{CO}_2$  знижуються майже на 40 %, а відновлювані джерела забезпечують понад половину енергобалансу – 56 %, що підтверджує доцільність впровадження гібридних систем на морських суднах з метою підвищення екологічної та паливної ефективності.

Таблиця 2

**Порівняльна характеристика ефективності систем**

| Конфігурація системи     | Економія пального (%) | Зниження $\text{CO}_2$ (%) | Частка альтернативної енергії (%) |
|--------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Дизельна                 | 0                     | 0                          | 0                                 |
| Сонячна                  | 17,8                  | 15,2                       | 31,4                              |
| Вітрова                  | 23,5                  | 21,7                       | 44,1                              |
| Сонячно-вітрова гібридна | 43,1                  | 39,7                       | 56,0                              |

В таблиці 3 узагальнено основні параметри гібридної енергетичної системи судна, зокрема технічні характеристики сонячних панелей, вітрогенератора, акумуляторної батареї та дизельного генератора. Дані включають номінальну потужність, напругу, смінь, коефіцієнти ефективності та діапазони роботи для кожного з компонентів, а визначення цих параметрів дозволяє побудову точної симуляційної моделі, оскільки вони задають вхідні умови для розрахунків енергетичного балансу, заряду/розряду акумуляторів і визначення рівня покриття навантаження за рахунок відновлюваних джерел. Загалом такий структурований підхід дозволяє формалізувати поведінку системи в динаміці та оцінити її ефективність у різних сценаріях експлуатації.

Такі дані дозволяють створювати математичні моделі систем, які враховують параметри генерації, накопичення та конверсії енергії, що надалі можуть

використовуватись в симуляційних сценаріях для оцінки їх ефективності в реальних умовах експлуатації.

Таблиця 3

### Характеристики елементів гібридної енергосистеми судна

| Компонент               | Потужність, кВт | Номинальна напруга, В | Ефективність, % | Режим роботи                     | Примітки                                 |
|-------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|----------------------------------|------------------------------------------|
| Сонячна панель          | 15              | 24                    | 18              | Денний                           | Монокристалічний кремній, 20 шт.         |
| Вітрова турбіна         | 5               | 48                    | 25              | Цілодобовий (за наявністю вітру) | Низькошвидкісна, горизонтальна вісь      |
| Дизель-генератор        | 30              | 230                   | 35              | Резервний/піковий                | Автоматичне підключення за навантаженням |
| Літій-іонний акумулятор | 100             | 48                    | 92              | Змінний                          | Глибина заряду 80 %, ресурс 5000 циклів  |
| Інвертор                | 50              | 230                   | 95              | Цілодобовий                      | Автоматичне керування потоками енергії   |
| Контролер заряду        | 20              | 48                    | 97              | Змінний                          | MPPT алгоритм, адаптивний режим          |

Таким чином на основі симуляційних результатів, які представлені, встановлено, що гібридні енергосистеми, зокрема сонячно-вітрова конфігурація, забезпечують найбільшу ефективність серед усіх аналізованих варіантів. Вони демонструють суттєве зниження витрат пального та викидів CO<sub>2</sub> при одночасному зростанні частки альтернативної енергії, що підтверджує їхню доцільність для впровадження у сучасному енергоефективному судноплаванні.

**Висновки.** Оцінка результатів моделювання гібридних енергосистем морських суден дозволила сформулювати такі узагальнені висновки. Побудована комплексна симуляційна модель з урахуванням сонячної, вітрової, дизельної та акумуляторної підсистем забезпечує можливість гнучкого управління енергетичним балансом судна в динамічних умовах експлуатації. За результатами чисельного аналізу встановлено, що впровадження гібридної сонячно-вітрової системи дозволяє досягти економії палива до 43,1 % і зниження викидів CO<sub>2</sub> на 39,7 % у порівнянні з класичною дизельною конфігурацією. Виявлено, що гібридні установки забезпечують більш стабільний заряд акумуляторів та ефективніше використовують флуктуаційну генерацію від ВДЕ. Розрахунки свідчать про те, що оптимальні режими роботи гібридної системи залежать не лише від характеристик джерел енергії, а й від морських умов, маршруту та типу судна. Удосконалення стратегії управління потужністю з урахуванням квазістохастичних моделей та цифрових двійників дає змогу значно покращити точність прогнозування енергоспоживання. Представлена модель дозволяє масштабувати результати на різні типи суден без необхідності натурного експерименту, а розроблений підхід має практичну цінність слугуючи ефективним інструментом в реалізації загальної концепції екобезпечного судноплавання.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:**

1. Liu X., Wang K., Guo X., Li Z., Wu J., Ma R., Huang L., Li X. An integrated energy efficiency optimization method of the wind-assisted hybrid ship for the shipping decarbonization. *Marine Pollution Bulletin*. 2025. Vol. 212. No. 117579. P. 1–15.
  2. Wan T., Fu H., Li X., Wu F., Luo C., Zhang L. Assessment of decarbonization pathway for Chinese road transport sector based on transportation-energy integration systems framework. *Energy*. 2025. Vol. 317. No. 134727. P. 1–13.
  3. Li X., Pan L., Zhang J., Jin Z., Jiang W., Wang Y., Liu L., Tang R., Lai J., Yang X., Zhang Y. A novel capacity allocation method for hybrid energy storage system for electric ship considering life cycle cost. *Journal of Energy Storage*. 2025. Vol. 116. No. 116070. P. 1–11.
  4. Onishchenko O., Golikov V., Melnyk O., Onyshchenko S., Obertiur K. Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022. Vol. 116. P. 223–235.
  5. Onishchenko O., Bukaros A., Melnyk O., Yarovenko V., Voloshyn A., Lohinov O. Ship refrigeration system operating cycle efficiency assessment and identification of ways to reduce energy consumption of maritime transport. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2023. Vol. 481. P. 641–652.
  6. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S., Voloshyn A., Ocheretna V. Comprehensive study and evaluation of ship energy efficiency and environmental safety management measures. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2023. Vol. 481. P. 665–679.
  7. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S. Renewable energy concept development and application in shipping industry. *Lex Portus*. 2023. Vol. 9. No. 6. P. 15–24.
  8. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S., Yaremenko N., Maliuha E., Honcharuk I., Shamov O. Innovative technologies for the maritime industry: Hydrogen fuel as a promising direction. *Modern Technologies in Energy and Transport. Studies in Systems, Decision and Control*. 2024. Vol. 510. P. 23–34.
  9. Liu H., Fan A., Li Y., Bucknall R., Vladimir N. Multi-objective hierarchical energy management strategy for fuel cell/battery hybrid power ships. *Applied Energy*. 2024. Vol. 379. No. 124981. P. 1–14.
  10. Xia M., Li C., Yao S., Yan X., Wang C. Energy, exergy, economy analysis and multi-objective optimization of SOFC/GT/SCO<sub>2</sub> hybrid power system for ships based on zero-carbon emissions. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 98. P. 1430–1449.
  11. Zhu L., Liu Y., Zeng Y., Guo H., Ma K., Liu S., Zhang Q. Energy management strategy for fuel cell hybrid ships based on deep reinforcement learning with multi-optimization objectives. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 93. P. 1258–1267.
  12. Gao D., Chen L., Wang Y. An energy trade-off management strategy for hybrid ships based on event-triggered model predictive control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2024. Vol. 162. No. 110312. P. 1–12.
  13. Guo X., Lang X., Yuan Y., Tong L., Shen B., Long T., Mao W. Energy management system for hybrid ship: Status and perspectives. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 310. No. 118638. P. 1–15.
  14. Barone G., Buonomano A., Del Papa G., Maka R., Palombo A. Approaching zero emissions in ports: Implementation of batteries and supercapacitors with smart energy management in hybrid ships. *Energy Conversion and Management*. 2024. Vol. 314. No. 118446. P. 1–18.
  15. Wang X., Zhu H., Luo X., Chang S., Guan X. A novel optimal dispatch strategy for hybrid energy ship power system based on the improved NSGA-II algorithm. *Electric Power Systems Research*. 2024. Vol. 232. No. 110385. P. 1–10.
-

## REFERENCES:

1. Liu, X., Wang, K., Guo, X., Li, Z., Wu, J., Ma, R., Huang, L., & Li, X. (2025). An integrated energy efficiency optimization method of the wind-assisted hybrid ship for the shipping decarbonization. *Marine Pollution Bulletin*, 212, 117579.
2. Wan, T., Fu, H., Li, X., Wu, F., Luo, C., & Zhang, L. (2025). Assessment of decarbonization pathway for Chinese road transport sector based on transportation-energy integration systems framework. *Energy*, 317, 134727.
3. Li, X., Pan, L., Zhang, J., Jin, Z., Jiang, W., Wang, Y., Liu, L., Tang, R., Lai, J., Yang, X., & Zhang, Y. (2025). A novel capacity allocation method for hybrid energy storage system for electric ship considering life cycle cost. *Journal of Energy Storage*, 116, 116070.
4. Onishchenko, O., Golikov, V., Melnyk, O., Onyshchenko, S., & Obertiur, K. (2022). Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 116, 223–235.
5. Onishchenko, O., Bukaros, A., Melnyk, O., Yarovenko, V., Voloshyn, A., & Lohinov, O. (2023). Ship refrigeration system operating cycle efficiency assessment and identification of ways to reduce energy consumption of maritime transport. In *Studies in Systems, Decision and Control* (Vol. 481, pp. 641–652). Springer.
6. Melnyk, O., Onishchenko, O., Onyshchenko, S., Voloshyn, A., & Ocheretna, V. (2023). Comprehensive study and evaluation of ship energy efficiency and environmental safety management measures. In *Studies in Systems, Decision and Control* (Vol. 481, pp. 665–679). Springer.
7. Melnyk, O., Onishchenko, O., & Onyshchenko, S. (2023). Renewable energy concept development and application in shipping industry. *Lex Portus*, 9(6), 15–24.
8. Melnyk, O., Onishchenko, O., Onyshchenko, S., Yaremenko, N., Maliuha, E., Honcharuk, I., & Shamov, O. (2024). Innovative technologies for the maritime industry: Hydrogen fuel as a promising direction. In *Modern Technologies in Energy and Transport. Studies in Systems, Decision and Control* (Vol. 510, pp. 23–34). Springer.
9. Liu, H., Fan, A., Li, Y., Bucknall, R., & Vladimir, N. (2024). Multi-objective hierarchical energy management strategy for fuel cell/battery hybrid power ships. *Applied Energy*, 379, 124981.
10. Xia, M., Li, C., Yao, S., Yan, X., & Wang, C. (2024). Energy, exergy, economy analysis and multi-objective optimization of SOFC/GT/SCO<sub>2</sub> hybrid power system for ships based on zero-carbon emissions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 98, 1430–1449.
11. Zhu, L., Liu, Y., Zeng, Y., Guo, H., Ma, K., Liu, S., & Zhang, Q. (2024). Energy management strategy for fuel cell hybrid ships based on deep reinforcement learning with multi-optimization objectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 93, 1258–1267.
12. Gao, D., Chen, L., & Wang, Y. (2024). An energy trade-off management strategy for hybrid ships based on event-triggered model predictive control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 162, 110312.
13. Guo, X., Lang, X., Yuan, Y., Tong, L., Shen, B., Long, T., & Mao, W. (2024). Energy management system for hybrid ship: Status and perspectives. *Ocean Engineering*, 310, 118638.
14. Barone, G., Buonomano, A., Del Papa, G., Maka, R., & Palombo, A. (2024). Approaching zero emissions in ports: Implementation of batteries and supercapacitors with smart energy management in hybrid ships. *Energy Conversion and Management*, 314, 118446.
15. Wang, X., Zhu, H., Luo, X., Chang, S., & Guan, X. (2024). A novel optimal dispatch strategy for hybrid energy ship power system based on the improved NSGA-II algorithm. *Electric Power Systems Research*, 232, 110385.