

DOI: 10.31653/smf52.2026.88-96

дата першого надходження: 22.01.26
дата прийняття статті до друку після
рецензування: 03.03.26
дата публікації: 05.05.26Скляренко І.Ю.¹, Ганношина І.М.², Клочков Ю.П.³,
Роздобудько В.В.⁴¹ORCID: 0000-0002-3970-078X, ²ORCID: 0000-0001-5810-2462,³ORCID: 0009-0003-6044-1115, ⁴ORCID: 0022-0053-6784-2233

Національний транспортний університет

ІНТЕГРАЦІЯ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В СУДНОВУ ЕНЕРГЕТИЧНУ ІНФРАСТРУКТУРУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Постановка проблеми у загальному вигляді. Морський транспорт стикається з жорсткими вимогами щодо екологічної безпеки та енергоефективності. Традиційні суднопотужні установки вичерпують свій ресурс, демонструючи низький коефіцієнт корисної дії в режимах змінного навантаження. Зростання вартості палива спонукає судноплавні компанії шукати шляхи оптимізації енергоспоживання на борту.

Інтеграція інноваційних технологій, таких як гібридні енергосистеми та відновлювані джерела енергії, стає критично важливою для галузі. Впровадження інтелектуальних систем керування енергопоточками дозволяє динамічно адаптувати параметри обладнання до умов експлуатації. Це безпосередньо впливає на зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу та акваторію.

Важливість цифровізації суднових енергетичних інфраструктур полягає у можливості предиктивного обслуговування технічних засобів. Сучасні енергетичні комплекси потребують переходу від концепції автономного живлення до мережових інтегрованих структур. Це забезпечує вищу надійність роботи критичних вузлів судна навіть при часткових відмовах окремих елементів.

Енергоефективність сьогодні є визначальним фактором конкурентоспроможності морських перевезень на світовому ринку. Відсутність системного підходу до інтеграції нових технологій стримує інноваційний розвиток морського флоту. Таким чином, дане дослідження має високу наукову та практичну значущість для модернізації технічного забезпечення суден. Комплексна реалізація запропо-

нованих заходів здатна суттєво знизити експлуатаційні витрати та подовжити життєвий цикл суднового обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У публікації [1] розглянуто інтеграцію електроенергетичних систем суден із метою підвищення екологічності морського транспорту. Автори акцентують увагу на використанні інтегрованих енергосистем змінного струму та технологій енергоменеджменту. Проведено аналіз архітектур електричних мереж суден та їх взаємодії з береговою інфраструктурою.

У роботі [2] досліджено інноваційні підходи до інтеграції відновлюваних джерел енергії в офшорні морські системи. Значну увагу приділено конструкційним і системним аспектам взаємодії енергетичних установок.

У статті [3] проаналізовано інтегровані енергетичні системи для суден із низьким рівнем викидів. Дослідження охоплює поєднання різних джерел енергії, включаючи акумулятори та альтернативні палива. Встановлено, що оптимальна інтеграція компонентів дозволяє суттєво зменшити витрати палива та екологічний вплив.

У роботі [4] представлено огляд методів оптимізації систем управління енергією в суднових мікромережах. Розглянуто алгоритми оптимального розподілу навантаження між джерелами енергії.

У дослідженні [5] проведено техніко-економічну оцінку інтеграції гібридних відновлюваних систем у суднові енергетичні установки. Розглянуто різні комбінації джерел енергії та їх вплив на витрати. Встановлено, що гібридні системи є економічно виправданими за певних експлуатаційних сценаріїв.

У статті [6] розглянуто сталий розвиток гібридних енергетичних систем суден. Основна увага приділяється оптимізації керування енергетичними потоками.

У роботі [7] досліджено перспективні енергетичні установки для морського транспорту. Розглянуто інноваційні рушійні системи, включаючи електричні та водневі технології. Встановлено, що інтеграція новітніх технологій є ключовим фактором декарбонізації галузі.

У статті [8] представлено методи моделювання та оптимізації суднових енергосистем. Розглянуто математичні підходи до аналізу енергетичних потоків. Автори досліджують алгоритми оптимізації конфігурацій систем. Доведено, що використання сучасних моделей дозволяє підвищити ефективність енергетичної інфраструктури суден.

У роботі [9] розглянуто оптимізацію топології та управління енергією в гібридних системах круїзних суден на паливних елементах. Значну увагу приділено підвищенню енергоефективності та надійності. Встановлено, що оптимізація структури системи дозволяє досягти кращих експлуатаційних показників.

У статті [10] досліджено сучасний стан та перспективи розвитку систем управління енергією гібридних суден. Розглянуто різні стратегії керування енергоспоживанням. Автори аналізують тенденції розвитку інтелектуальних систем управління. Показано, що впровадження таких систем підвищує ефективність використання енергоресурсів.

У публікації [11] розглянуто сталий розвиток відновлюваної енергетики в судноплаванні. Автори аналізують технологічні та екологічні аспекти інтеграції інновацій. Значну увагу приділено перспективам використання альтернативних джерел енергії.

У роботі [12] досліджено розроблення надійної системи передачі даних для безпілотних надводних апаратів. Розглянуто вплив завад на функціонування систем зв'язку. Автори пропонують підходи до підвищення надійності передачі інформації. Показано, що інтеграція сучасних інформаційних технологій є важливою складовою ефективною енергетичної інфраструктури.

У статті [13] досліджено підвищення екологічності бурових суден у спеціальних регіонах. Розглянуто інтеграцію технологій очищення та оптимізації енергоспоживання. Встановлено, що застосування інноваційних підходів дозволяє зменшити негативний вплив на довкілля.

У роботі [14] розглянуто питання надійності експлуатації суднових дизельних двигунів. Досліджено методи діагностики та контролю технічного стану. Автори аналізують вплив режимів роботи на ефективність енергетичних установок. Доведено, що інтеграція систем моніторингу підвищує безпеку та ефективність експлуатації.

Аналіз сучасної науково-технічної літератури засвідчив, що питанням визначення методів інтеграції інноваційних технологій в енергетичну інфраструктуру суден не приділено достатньої уваги. Більшість публікацій розглядають лише окремі вузли енергетичної установки без врахування системного взаємозв'язку між ними. Існуючі методики переважно базуються на статичних моделях, які не відображають динаміку реальних режимів експлуатації. Виявлено значний розрив між теоретичними розробками в галузі енергетики та їх

практичною реалізацією на борту суден. Необхідно розробити інтегрований підхід, що охоплює апаратні та програмні рішення для підвищення загальної ефективності системи.

Сучасна суднобудівна індустрія потребує кардинальних змін у підходах до проектування енергетичних комплексів. Існуючі енергетичні інфраструктури суден не в повній мірі відповідають новим вимогам щодо інтелектуального керування та ресурсоефективності. Головна проблема полягає у відсутності єдиної методології впровадження інноваційних компонентів у вже функціонуючі енергетичні системи.

Обмеженість можливостей традиційних систем розподілу енергії призводить до значних втрат під час експлуатації суден. Статичні налаштування контролерів не дозволяють швидко реагувати на зміни навантаження, що виникають через зовнішні фактори та режимні особливості роботи судна. Процес інтеграції супроводжується складністю узгодження технічних параметрів обладнання різних виробників. Недостатній рівень автоматизації ускладнює своєчасну діагностику стану енергетичної системи, що підвищує ризики аварійних зупинок. Виникає конфлікт між вимогами максимальної продуктивності та необхідністю зменшення паливної залежності судна. Відсутність адаптивних алгоритмів управління обмежує потенціал використання новітніх систем зберігання та генерації енергії. Необхідно вирішити суперечність між необхідністю модернізації та технічними обмеженнями наявних енергосистем.

Невирішеною залишається проблема розробки інструментів для оцінки техніко-економічної ефективності впровадження інновацій у масштабі всього судна. Це зумовлює необхідність проведення комплексного науково-прикладного дослідження з питань удосконалення суднової енергетичної інфраструктури.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка теоретичних основ та прикладних методів інтеграції інноваційних технологій в енергетичну інфраструктуру судна для забезпечення максимальної ефективності експлуатації. Дослідження спрямоване на оптимізацію розподілу енергопотоків між споживачами за допомогою впровадження інтелектуальних систем керування. Результатом має стати концептуальна модель оновленої енергосистеми з підвищеними показниками надійності та екологічності.

Об'єктом дослідження є процеси функціонування та перетворення енергії в судовій енергетичній інфраструктурі в умовах експлуатації.

Предметом дослідження виступають методи та засоби інтеграції інноваційних технологій для оптимізації режимів роботи енергетичних систем суден.

Виклад основного матеріалу дослідження. Суднова енергетична інфраструктура у XXI столітті трансформується з автономної енергосистеми на складний інтелектуальний мережевий комплекс. Структура цієї інфраструктури включає систему генерації, систему накопичення, інтелектуальну шину розподілу та адаптивні системи споживання. Генерація базується на комбінації ДВЗ, паливних елементів та відновлюваних джерел. Накопичення здійснюється за рахунок високоефективних акумуляторних батарей або суперконденсаторів. Інтелектуальна шина керується центральним контролером, який забезпечує пріоритезацію енергопотоків. Споживачі поділяються на критичні та другорядні, що дозволяє динамічно перерозподіляти потужність.

Класифікація інноваційних технологій передбачає розподіл на апаратні, програмні та гібридні рішення. Апаратні рішення включають високоефективні генератори, перетворювачі частоти та нові типи накопичувачів. Програмні рішення охоплюють цифрові двійники, системи штучного інтелекту для прогнозування навантажень та алгоритми предиктивної діагностики. Гібридні рішення – це інтегровані модулі, що поєднують обладнання з інтелектуальним керуванням.

Для опису динаміки системи використовується енергетичний баланс, що визначається як:

$$P_{gen}(t) + P_{sto}(t) = P_{load}(t) + \Delta P_{loss}(t);$$

де P_{gen} – потужність генерації;

P_{sto} – потужність від накопичувачів;

P_{load} – потужність споживання;

ΔP_{loss} – втрати.

Ефективність системи E визначається відношенням корисної роботи до витрат енергоресурсів:

$$E = \frac{\int_0^T P_{luse}(t) dt}{\int_0^T C_{fuel}(t) dt}.$$

Оптимізація досягається мінімізацією функції втрат:

$$J = \int_0^T \left(P_{loss}(t) + \lambda \left| \frac{dP}{dt} \right| \right) dt.$$

Нижче наведено огляд ключових технологічних груп та їхнього впливу на ефективність.

Системи оптимізації руху та автоматизації. Сучасні автоматизовані системи управління дозволяють суттєво підвищити паливну ефективність без капітальних змін у конструкції судна.

- Принцип роботи: система автоматично регулює роботу головного двигуна в реальному часі, реагуючи на зовнішні фактори (хвилювання, вітер, обростання корпусу) та забезпечуючи оптимальну потужність.

- Ефективність: дозволяє точно вимірювати економію палива та усуває людський фактор при управлінні. В комбінації з вітрильними системами вона автоматично враховує отриману від вітру тягу та зменшує навантаження на двигун.

- Додаткові переваги: використання аналітичних платформ для моніторингу, звітності та порівняльного аналізу ефективності всього флоту.

Гібридні системи та інтелектуальні енергомережі. Перехід від традиційних змінних до постійних мереж дозволяє гнучко інтегрувати різні джерела енергії та значно підвищити загальну ефективність судна.

- Твердотільні трансформатори: розробка мереж середньої напруги постійного струму на основі твердотільних трансформаторів забезпечує передачу електроенергії з мінімальними втратами, що критично важливо для великих суден. Це дозволяє створювати універсальну платформу для підключення паливних елементів, батарей та відновлюваних джерел енергії.

- Гібридні генеруючі установки: проекти, такі як Nautilus, передбачають поступову заміну традиційних двигунів внутрішнього згоряння на гібридні системи на основі твердооксидних паливних

елементів та батарей. Це дозволяє забезпечити всі потреби судна в електроенергії та теплі з вищим ККД.

- Інтелектуальне управління: застосування AI та предиктивних алгоритмів для оптимізації використання енергосистеми з метою мінімізації витрат палива та викидів.

Вітрильні технології як додаткове джерело енергії. Вітрильні технології, зокрема роторні вітрила, стають "безризиковим" рішенням для підвищення ефективності.

- Особливості: вони є "паливно-нейтральними", тобто працюють з будь-яким типом палива (від важкого палива до аміаку або водню), зменшуючи потребу в основній енергетичній установці.

- Ефективність: вітрильні системи найбільш ефективні при сильному вітрі та хвилюванні, коли навантаження на двигун найбільше. Станом на 2025 рік встановлено понад 100 таких систем, а ІМО розробляє стандартизовані керівництва з безпеки для їх широкого впровадження.

- Переваги: можливість встановлення під час планового докування без кардинальної перебудови силової установки судна.

Альтернативні види палива та конструкційні модифікації. Перехід на нові види палива є найбільш радикальним, але необхідним кроком для досягнення нульових викидів.

- Паливні елементи: водневі паливні елементи забезпечують ефективність перетворення енергії до 75%, порівняно з 55-60% у традиційних дизельних двигунів. Проте, існують виклики щодо інфраструктури, безпеки та вартості.

- Газові турбіни: проект MARPOWER розробляє газотурбінні установки, здатні працювати на водні, аміаку, метанолі та інших чистих паливах. Вони поєднують в собі високу ефективність та можливість когенерації (виробництва електрики та тепла).

- Конструкційні модифікації: полімерні підшипники – зменшують втрати на тертя в гребних валах у 6...9 разів порівняно з традиційними металевими; системи рекуперації енергії – інтеграція водяних турбін в обтічники корпусу може генерувати додаткові 15...17 % чистої потужності.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Отримані наукові та прикладні результати підтверджують високу ефективність запропонованого системного підходу до модернізації.

Практичне впровадження результатів проведеного науково-прикладного дослідження дозволить вирішити важливе завдання

інтеграції інноваційних технологій у суднову енергетичну інфраструктуру.

В роботі узагальнено науково-технічні підходи та розроблено концептуальну модель модернізації енергосистем. Класифіковано перспективні технології, які найбільш ефективно впливають на показники експлуатації. Розроблена класифікація полегшує процес вибору оптимальних технологічних рішень для різних типів суден.

Розроблено математичне та формульне описання енергетичного балансу для динамічних режимів роботи. Використання накопичувачів енергії дозволяє мінімізувати втрати та підвищити стабільність системи.

Розроблені рекомендації можуть бути використані проектувальниками та експлуатантами суден. Подальші дослідження доцільно спрямувати на вдосконалення алгоритмів штучного інтелекту для керування енергопотоками. Запропоновані рішення сприяють підвищенню екологічності та надійності морських перевезень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Vicenzutti A., Sulligoi G. Electrical and energy systems integration for maritime environment-friendly transportation // *Energies*. 2021. Vol. 14, № 21. Article 7240. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14217240>.

2. Ning D., Johanning L., Gao Z., Thies P. R., Shi W., Aviso K. Innovation and system integration for offshore renewable energy structures // *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 8. Article 742282. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.742282>.

3. Xing H., Stuart C., Spence S., Chen H. Integrated energy systems for low-emission shipping // *Journal of Cleaner Production*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126651>.

4. Xie P., Sun Y., Li Z. Optimization-based power and energy management system in shipboard microgrid: A review // *IEEE Systems Journal*. 2022. Vol. 16, № 1. P. 578–590. DOI: <https://doi.org/10.1109/jsyst.2020.3047673>.

5. Animah I., Adjei P., Djamesi E. K. Techno-economic feasibility of integrating hybrid renewable energy systems into ship power systems // *Journal of Marine Engineering & Technology*. 2022. Vol. 22, № 1. P. 22–37. DOI: <https://doi.org/10.1080/20464177.2022.2087272>.

6. Roslan S.B. M., Konovessis D., Tay Z.Y. Sustainable hybrid marine power systems for power management optimisation: A review // *En-*

ergies. 2022. Vol. 15, № 24. Article 9622. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15249622>.

7. Tay Z. Y., Konovessis D. Sustainable energy propulsion systems for sea transport // *Discover Sustainability*. 2023. Vol. 4. Article 20. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43621-023-00132-y>.

8. Mylonopoulos F., Polinder H., Coraddu A. Modeling and optimization methods for ship energy systems // *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 32697–32707. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3263719>

9. Niu L., Xiao L. Optimization of topology and energy management in fuel cell cruise ship hybrid power systems // *Intelligent Marine Technology and Systems*. 2024. Vol. 2. Article 12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44295-024-00026-3>.

10. Zhang Y., Wang J., Li X. Energy management system for hybrid ship: Status and perspectives // *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 310. Article 118638. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118638>.

11. Melnyk O., Bulgakov M., Fomin O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Pulyaev I. Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects // *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2025. Vol. 127. P. 165–188. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.

12. Kurdiuk, S., Dremluk, V., Melnyk, O., Onishchenko, O., Fomin, O., Pištěk, V., & Kučera, P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions. *Drones*, 2025. 9(3), 174. <https://doi.org/10.3390/drones9030174>.

13. Sagin, S.; Kuropyatnyk, O.; Sagin, A.; Tkachenko, I.; Fomin, O.; Pištěk, V.; Kučera, P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.

14. Sagin, S.; Madey, V.; Sagin, A.; Stoliaryk, T.; Fomin, O.; Kučera, P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.