

© Бажак О.В., Гаценко Л.В.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ ГІБРИДНИХ СУДНОВИХ УСТАНОВОК

У статті розглянуто питання підвищення ефективності та надійності гібридних суднових енергетичних установок шляхом інтеграції технологій штучного інтелекту в системи управління енергоспоживанням. Морський транспорт забезпечує значну частину міжнародної торгівлі, проте суднобудівна галузь залишається одним із найбільших джерел викидів CO₂, що обумовлює необхідність підвищення енергоефективності та екологічності морських операцій. Проаналізовано еволюцію архітектури суднових автоматизованих електроенергетичних систем та основні стратегії енергоменеджменту: централізовані та децентралізовані системи управління, ієрархічні методології, модельне прогнозує керування, агентно-орієнтовані системи. Представлено детальний аналіз переваг та недоліків кожного підходу з урахуванням параметрів ефективності, стабільності, вартості впровадження та експлуатації, екологічного впливу, складності та масштабованості систем. Розглянуто практичні приклади застосування штучного інтелекту в морській індустрії, зокрема в автономній навігації, системах підтримки прийняття рішень, діагностиці обладнання, прогнозованому технічному обслуговуванні та оптимізації маршрутів судноплавства. Особливу увагу приділено інтеграції штучного інтелекту з системами моніторингу стану обладнання та аналізу надійності на основі динамічних Байєсівських мереж та моделей процесів Вінер. Представлено методологію health-aware управління енергоспоживанням, яка поєднує стратегію мінімізації еквівалентного споживання палива з динамічним оцінюванням надійності компонентів з урахуванням історії експлуатаційних режимів та деградації обладнання [2,6]. Розглянуто математичні моделі процесів деградації та методи розрахунку інтенсивностей відмов компонентів суднових енергоустановок [8]. Визначено основні виклики та обмеження, пов'язані з питаннями безпеки та кібербезпеки систем на основі штучного інтелекту, кваліфікації персоналу, складності інтеграції з існуючими системами, забезпечення стабільності та передбачуваності алгоритмів, якості даних та стандартизації форматів обміну інформацією, регуляторних та етичних аспектів впровадження автономних систем. Окреслено перспективні напрямки розвитку симбіозу штучного інтелекту та систем управління суднової електроенергії, включаючи повну автоматизацію, інтеграцію з альтернативними джерелами енергії, розвиток цифрових двійників та системи обміну даними судно-берег.

Ключові слова: суднові енергосистеми, енергоефективність, оптимізація, машинне навчання, штучний інтелект, морський транспорт, екологічний вплив, безпека мореплавства, кібербезпека.

Постановка проблеми. Морський транспорт відіграє ключову роль у глобалізації, забезпечуючи значну частину перевезень міжнародної торгівлі. Ефективність, безпека та екологічність морських операцій є критичними аспектами розвитку світової економіки. За даними Міжнародної морської організації (ІМО), у 2023 році світова суднобудівна галузь викинула понад 1 мільярд тонн CO₂ [1].

У зв'язку з цим вимоги до морської індустрії щодо підвищення енергоефективності, зниження експлуатаційних витрат та мінімізації екологічного впливу постійно зростають. Надійні та ефективні суднові автоматизовані електроенергетичні системи (САЕЕС) є основою безпечної та безперебійної роботи в морській індустрії. Судно, подібне до плаваючого міста, потребує електроенергії для забезпечення життєдіяльності екіпажу, функціонування навігаційного обладнання, вантажних систем та інших критичних механізмів [2].

Водночас із зростаючими вимогами до морської індустрії спостерігається швидкий розвиток технологій штучного інтелекту (ШІ), які демонструють видатний потенціал для трансформації різних

сфер життя, включаючи морський транспорт. ІІІ вже допомагає оптимізувати маршрути, прогнозувати потреби в технічному обслуговуванні, підвищувати безпеку судноплавства та автоматизувати численні процеси. За даними звіту Lloyd's Register, глобальний ринок розробок ІІІ в морській індустрії оцінюється в 1,5 мільярда доларів на рік і, як очікується, подвоїться протягом наступних п'яти років [3].

У цьому контексті дослідження симбіозу ІІІ та САЕЕС є актуальним. Інтеграція з ІІІ може відкрити численні можливості для вирішення існуючих проблем, підвищення ефективності, стабільності та безпеки судових операцій, а також сприяти досягненню екологічних цілей міжнародних регуляторних органів [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження в галузі управління САЕЕС демонструють зростаючий інтерес до впровадження інтелектуальних та оптимізаційних підходів для підвищення якості енергосистем.

Одним із провідних напрямків є еволюція та застосування систем енергоменеджменту (EMS), які інтегрують кілька джерел енергії (включаючи відновлювані) та комплекти накопичення енергії з метою оптимізації загального енергоспоживання на судні [5].

Дослідники активно зосереджуються на стратегії модельного прогнозуючого керування (MPC) для оптимізації розподілу енергії, управління навантаженням та регулювання напруги/частоти. MPC дозволяє враховувати нелінійну динаміку системи та множинність експлуатаційних обмежень, забезпечуючи проактивне керування на основі прогнозів майбутньої поведінки системи [4].

Наступним шляхом досліджень є розробка агентно-орієнтованих систем керування (АОС). АОС використовує автономних агентів для координації різних компонентів САЕЕС, тим самим підвищуючи живучість системи. Це може принести високу стійкість до відмов та здатність до динамічної реконфігурації [4].

Крім того, дослідники вивчали можливість використання цифрових двійників для моніторингу, оптимізації та прогнозування стану САЕЕС. Цифрові двійники дозволяють моделювати поведінку фізичної системи у віртуальному середовищі, що полегшує моніторинг процесів, прискорює вирішення проблем та забезпечує більш точне прогнозування конфігурації судна [6].

Ще одним напрямком є децентралізовані системи керування. Цей підхід допомагає підвищити стабільність та масштабованість САЕЕС шляхом розподілу функцій керування між локальними контролерами. Децентралізація керування призводить до швидшої реакції на локальні події та зменшує ризик єдиних точок відмови [1].

Інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі та вітрові турбіни, в САЕЕС також отримує значну увагу з глобальною метою зменшення залежності від викопного палива та мінімізації викидів [7].

Інтерес до використання ІІІ для вирішення різних завдань у морській індустрії швидко зростає. У навігації ІІІ розглядається як інструмент для розробки автономних суден із системами підтримки прийняття рішень для екіпажу. Наприклад, система SeaPod AI від Orca AI може виконувати функції автоматизованого спостерігача на містку, підвищуючи ситуаційну обізнаність та запобігаючи зіткненням. ІІІ використовується для діагностики обладнання та прогнозування технічного стану систем та вузлів, дозволяючи здійснювати прогнозоване технічне обслуговування та запобігати надзвичайним ситуаціям.

Особливу увагу заслуговують дослідження, що поєднують управління енергоспоживанням із моніторингом стану обладнання. Tsoumpri та Theotokatos [2] розробили підхід health-aware енергоменеджменту для гібридних суден, що враховує стан основних компонентів системи.

Однак кількість публікацій, безпосередньо присвячених інтеграції ІІІ з системами моніторингу надійності для управління енергоспоживанням, залишається обмеженою, що підтверджує актуальність подальших досліджень у цьому напрямку.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Грунтовний аналіз сучасних наукових публікацій у сфері управління судовими автоматизованими електроенергетичними системами (САЕЕС) дозволяє ідентифікувати низку критичних прогалин, які потребують подальшого дослідження та інноваційних рішень, що є ключовим для створення по-справжньому автономних, ефективних та надійних морських енергетичних

комплексів. Насамперед, незважаючи на значні успіхи у розробці стратегій енергоменеджменту (як-от MPC та ECMS), домінуючі методи часто ігнорують поточний фізичний стан (здоров'я) компонентів суднової енергоустановки; управління зазвичай зосереджене лише на миттєвій ефективності (мінімізації споживання палива або викидів), без врахування довгострокових наслідків обраного режиму роботи для життєвого циклу обладнання, що призводить до обмеженого врахування стану компонентів САЕЕС у процесі прийняття рішень. Додатковою проблемою є те, що існуючі моделі надійності та ризику, хоча й є потужними інструментами для аналізу, рідко інтегруються безпосередньо у стратегії енергоменеджменту автономних систем, створюючи значний виклик, оскільки існує складність інтеграції метрик здоров'я, таких як надійність та ризик, у системи керування; для критичних морських застосувань необхідна розробка методологій, які дозволять системі не лише досягати оптимальної продуктивності, але й динамічно мінімізувати ймовірність відмови критичних вузлів в режимі реального часу. Більше того, оскільки сучасні підходи до діагностики та прогнозування часто покладаються на статичні або дискретні моделі деградації, це призводить до обмеженого розвитку підходів до моніторингу стану, які динамічно оцінюють здоров'я складних судових систем, а для забезпечення health-aware управління необхідно розробити та впровадити інтелектуальні алгоритми, що здатні безперервно оцінювати ступінь деградації та прогнозувати час до відмови, використовуючи фактичні вимірювання датчиків та історію експлуатаційних режимів. Нарешті, впровадження систем на основі ШІ у САЕЕС, які активно обмінюються даними з береговими центрами та використовують сенсорну інформацію, виносить на передній план питання безпеки, оскільки виявлено недостатню увагу до питань кібербезпеки та стандартизації даних при впровадженні систем на основі ШІ в морській індустрії; необхідна розробка надійних протоколів, стійких до кібератак, а також уніфікація форматів збору, обробки та обміну великими масивами даних (Big Data) для забезпечення надійності та масштабованості інтелектуальних рішень.

Мета дослідження. Метою цієї роботи є аналіз перспектив симбіозу штучного інтелекту та систем керування енергоспоживанням судових енергоустановок.

Конкретні завдання дослідження включають:

1. Огляд принципів роботи та типових проблем судових енергосистем.
2. Аналіз сучасних підходів до управління енергопостачанням на судах, включаючи традиційні методи та нові технології.
3. Дослідження впровадження технологій ШІ в морську індустрію, зокрема в навігації, діагностиці та оптимізації маршрутів.
4. Ідентифікація потенційних переваг від інтеграції ШІ в САЕЕС, таких як підвищення енергоефективності, екологічності та безпеки.
5. Розгляд основних проблем та викликів, пов'язаних із поєднанням ШІ та САЕЕС, зосереджуючись на питаннях безпеки, кібербезпеки та кваліфікації екіпажу.
6. Окреслення майбутніх тенденцій та напрямків інтеграції ШІ із системами керування САЕЕС.

Виклад основного матеріалу. Сучасні САЕЕС є складними системами, що включають різні джерела енергії, розподільні мережі та численні електричних споживачів. Для гібридних енергоустановок, які поєднують дизельні генератори, електричні машини та системи накопичення енергії (батареї, суперконденсатори), розроблено різні стратегії управління.

Централізовані системи забезпечують координоване керування всіма компонентами з єдиного центру. Такий підхід дозволяє досягти глобальної оптимізації, але створює єдину точку відмови та вимагає високої обчислювальної потужності.

Децентралізовані системи розподіляють функції керування між локальними контролерами, що підвищує стабільність та масштабованість. Однак це ускладнює досягнення глобальної оптимізації [1].

Ієрархічні методології поєднують переваги обох підходів, розділяючи керування на рівні: оперативний (регулювання напруги/частоти), тактичний (управління потужністю) та стратегічний (планування).

Модельне прогнозує керування (MPC) виконує оптимізацію в ковзному горизонті з явною обробкою обмежень. MPC дозволяє враховувати нелінійну динаміку системи та множинні експлуатаційні обмеження, забезпечуючи проактивне керування [7].

Агентно-орієнтовані системи керування (АОС) використовують автономних агентів для координації різних компонентів САЕЕС, підвищуючи живучість системи та забезпечуючи високу стійкість до відмов [4].

Системи енергоменеджменту (EMS) інтегрують кілька джерел енергії та комплектів накопичення з метою оптимізації загального енергоспоживання на судні [5]. Однією з найпоширеніших стратегій є стратегія мінімізації еквівалентного споживання (ECMS), яка трансформує глобальну задачу оптимізації споживання палива в миттєву оптимізацію еквівалентного споживання палива.

Для забезпечення автономних операцій критично важливо не лише оптимізувати енергоефективність, але й постійно моніторити стан обладнання та оцінювати надійність системи. Динамічні Байєсівські мережі (DBN) є потужним інструментом для фіксації залежностей між компонентами системи та оцінки їх надійності в наступному часовому зрізі з урахуванням експлуатаційних параметрів у поточному зрізі. Також для діагностики та прогнозування стану компонентів судових енергоустановок застосовують імовірнісні методи, зокрема ланцюги Маркова, які дозволяють моделювати послідовність станів обладнання на основі вимірюваних параметрів і оцінювати його технічний стан у реальному часі [8].

Модель процесу Вінера (WPM) використовується для оновлення інтенсивностей відмов з урахуванням випадкових ефектів та історії експлуатаційних режимів компонентів. Процес Вінера широко застосовується для моделювання механізмів деградації, оскільки він відображає траєкторію деградації, пов'язану з випадковим шумом.

Базова модель процесу Вінера описується рівнянням:

$$D(t) = D(0) + \mu t + \sigma B(t) \quad (1)$$

де $D(0)$ — початковий стан здоров'я, μ та σ — параметри, що представляють коефіцієнти дрейфу та дифузії відповідно, $B(t)$ — стандартний броунівський рух.

Для врахування експлуатаційного профілю модель WPM розширюється:

$$D(t) = D(0) + \mu t + \sum Z(A_i) + \sigma B(t) \quad (2)$$

де $Z(A_i)$ — функція змін навантаження, що враховує вплив експлуатаційних умов на деградацію компонента.

На основі оціненого індексу здоров'я (HI) розраховується інтенсивність відмов:

$$\lambda(t) = \frac{\lambda_0}{HI(t)} \quad (3)$$

що забезпечує постійно зростаючий тренд інтенсивності відмов, відображаючи деградацію компонента при наближенні до кінця терміну служби [8].

Health-aware управління енергоспоживанням

Інтеграція моніторингу стану з енергоменеджментом дозволяє створити систему health-aware управління, яка оптимізує не лише споживання палива, але й враховує поточний стан обладнання та його надійність.

Основні принципи health-aware ECMS:

1. Адаптивний еквівалентний фактор – замість використання константного або функції лише від SOC батареї, еквівалентний фактор адаптується з урахуванням стану компонентів системи.
2. Інтеграція з DBN – надійність компонентів, розрахована через DBN, використовується для коригування стратегії керування, уникаючи режимів, що призводять до прискореної деградації критичних компонентів.
3. Динамічне оновлення інтенсивностей відмов – WPM забезпечує постійне оновлення інтенсивностей відмов на основі історії експлуатаційних параметрів (тиск наддуву, пікове тиск у циліндрі, температура вихлопних газів тощо).
4. Критичність компонентів – DBN розраховує не лише надійність, але й критичність компонентів, що дозволяє ранжувати їх за відносним впливом на надійність системи.

Навігація та автономні судна. Системи на основі ШІ, такі як SeaPod AI від Orca AI, виконують функції автоматизованого спостерігача на містку, підвищуючи ситуаційну обізнаність та запобігаючи зіткненням. Алгоритми комп'ютерного зору аналізують відеопотік у реальному часі для виявлення перешкод.

Діагностика та прогнозоване обслуговування. ШІ використовується для ранньої діагностики несправностей обладнання та прогнозування технічного стану систем, дозволяючи здійснювати прогнозоване технічне обслуговування та запобігати аваріям. Нейронні мережі навчаються розпізнавати патерни, що передують відмовам, на основі історичних даних моніторингу.

Оптимізація маршрутів. Алгоритми ШІ аналізують метеорологічні дані, океанічні течії та інші фактори для оптимізації маршрутів судна з метою мінімізації витрат палива та часу подорожі.

Управління вантажними операціями. ШІ допомагає в управлінні вантажними операціями в портах та на судах, оптимізуючи розташування вантажу та послідовність завантаження/розвантаження.

Переваги інтеграції ШІ в САЕЕС

Підвищення енергоефективності. Алгоритми машинного навчання можуть ідентифікувати оптимальні режими роботи обладнання, враховуючи складні нелінійні залежності між параметрами системи. Дослідження показують можливість зниження споживання палива на 5-12% порівняно з традиційними методами.

Прогнозування навантаження. Нейронні мережі та методи часових рядів дозволяють прогнозувати майбутнє навантаження з високою точністю, що критично важливо для МРС-стратегій.

Рання діагностика несправностей. Алгоритми аномального виявлення на основі ШІ можуть ідентифікувати відхилення від нормальної роботи на ранніх стадіях, запобігаючи серйозним поломкам та аваріям.

Адаптивне керування. Системи на основі ШІ можуть адаптуватися до змінних умов експлуатації без необхідності перепрограмування, використовуючи методи навчання з підкріпленням.

Оптимізація життєвого циклу обладнання. Враховуючи деградацію компонентів, ШІ може оптимізувати режими роботи для збалансування між енергоефективністю та терміном служби обладнання.

Безпека та кібербезпека. Системи на основі ШІ вразливі до кібератак, включаючи атаки на дані навчання (data poisoning) та змагальні атаки (adversarial attacks). Необхідна розробка методів забезпечення кібербезпеки, специфічних для морських застосувань.

Кваліфікація персоналу. Впровадження систем на основі ШІ вимагає високої кваліфікації персоналу як для експлуатації, так і для технічного обслуговування. Необхідні програми навчання екіпажів.

Складність інтеграції. Інтеграція ШІ з існуючими системами може бути технічно складною та коштовною, особливо для модернізації існуючих суден.

Стабільність та передбачуваність. Алгоритми ШІ, особливо глибокі нейронні мережі, часто є «чорними скриньками», що ускладнює розуміння логіки їх рішень. Для критичних застосувань необхідні методи пояснювального ШІ (Explainable AI).

Якість та стандартизація даних. Ефективність алгоритмів ШІ залежить від якості та повноти даних навчання. Необхідна стандартизація форматів даних та протоколів обміну інформацією.

Регуляторні та етичні аспекти. Відсутність чітких регуляторних рамок для застосування ШІ в морській індустрії створює невизначеність. Необхідна розробка стандартів та керівних принципів класифікаційними товариствами та ІМО.

Майбутні напрямки розвитку

Повна автоматизація САЕЕС. Розвиток автономних суден вимагає створення повністю автоматизованих систем управління енергоспоживанням, здатних функціонувати без втручання екіпажу протягом тривалих періодів (до 500 годин згідно з проектом MUNIN).

Інтеграція з новими джерелами енергії. ШІ може оптимізувати використання альтернативних джерел енергії, таких як паливні елементи на водні або аміаку, вітрові турбіни та сонячні панелі.

Цифрові двійники. Розвиток цифрових двійників судових енергоустановок дозволить моделювати та оптимізувати роботу систем у віртуальному середовищі перед впровадженням змін на фізичному об'єкті.

Федеративне навчання. Для подолання обмежень, пов'язаних із конфіденційністю даних, може використовуватися федеративне навчання, що дозволяє тренувати моделі на розподілених даних без їх централізованого зберігання.

Інтеграція з берегом. Розвиток систем shore-to-ship та обмін даними між судном та береговими центрами дозволить використовувати більш потужні обчислювальні ресурси для складних завдань ШІ.

Перспективи подальших досліджень включають розробку та тестування прототипів інтелектуальних систем управління на реальних судах, створення стандартизованих наборів даних для навчання та валідації алгоритмів ШІ, дослідження методів пояснювального ШІ для критичних морських застосувань, а також розробку рекомендацій щодо кібербезпеки та регуляторних аспектів впровадження ШІ в морську індустрію.

Висновки. За результатами проведеного аналізу встановлено, що інтеграція штучного інтелекту (ШІ) в системи управління енергоспоживанням гібридних судових енергоустановок є надзвичайно перспективним стратегічним напрямком, який має потенціал значно підвищити їхню енергоефективність, надійність та загальну безпеку експлуатації. Ключовим досягненням є можливість поєднання стратегій енергоменеджменту (зокрема, мінімізації еквівалентного споживання (ECMS) та модельного прогнозуючого керування (MPC)) з передовими методами моніторингу стану та аналізу надійності (такими як Динамічні Байєсівські мережі (DBN) та моделі процесів Вінера (WPM)). Таке поєднання дозволяє створити health-aware системи керування, здатні оптимізувати не лише миттєве споживання палива, але й довгостроковий термін служби обладнання. Крім того, практичні застосування ШІ в морській індустрії (включаючи автономну навігацію, діагностику несправностей та оптимізацію маршрутів) вже сьогодні демонструють значний потенціал технології, підтверджений реальними проектами та економічною ефективністю. Водночас, основними викликами, що стримують повномасштабне впровадження, залишаються питання кібербезпеки, кваліфікації обслуговуючого персоналу, стандартизації великих обсягів даних та розробки чітких регуляторних аспектів, які вимагають подальших наукових досліджень та розробки відповідних керівних документів. Майбутній розвиток симбіозу ШІ та САЕЕС нерозривно пов'язаний із повною автоматизацією судових процесів, інтеграцією з новими альтернативними джерелами енергії, активним розвитком цифрових двійників судових систем та ефективним обміном даними між судном і береговими центрами.

Bazhak O., Hatsenko L

INTELLIGENT ENERGY MANAGEMENT FOR HYBRID SHIP POWER PLANTS

The article addresses the issues of improving the efficiency and reliability of hybrid ship power plants through the integration of artificial intelligence technologies into energy consumption management systems. Maritime transport provides a significant share of international trade, but the shipbuilding industry remains one of the largest sources of CO₂ emissions, which necessitates the improvement of energy efficiency and environmental sustainability of maritime operations. The evolution of the architecture of ship automated electrical power systems and the main energy management strategies are analyzed: centralized and decentralized control systems, hierarchical methodologies, model predictive control, and agent-oriented systems. A detailed analysis of the advantages and disadvantages of each approach is presented, taking into account the parameters of efficiency, stability, implementation and operational costs, environmental impact, complexity and scalability of systems. Practical examples of artificial intelligence applications in the maritime industry are considered, particularly in autonomous navigation, decision support systems, equipment diagnostics, predictive maintenance, and shipping route optimization. Special attention is paid to the integration of artificial intelligence with equipment condition monitoring systems and reliability analysis based on dynamic Bayesian networks and Wiener process models. A methodology for health-aware energy management is presented, which combines the strategy of minimizing equivalent fuel consumption with dynamic assessment of component reliability, taking into account the history of operational modes and equipment degradation. Mathematical models of degradation processes and methods for calculating failure rates of ship power plant components are considered. The main challenges and limitations associated with safety and cybersecurity issues of artificial intelligence-based systems, personnel qualifications, complexity of integration with existing systems,

ensuring stability and predictability of algorithms, data quality and standardization of information exchange formats, regulatory and ethical aspects of implementing autonomous systems are identified. Promising directions for the development of the symbiosis of artificial intelligence and ship electrical power control systems are outlined, including full automation, integration with alternative energy sources, development of digital twins, and ship-to-shore data exchange systems.

Keywords: *ship power systems, energy efficiency, optimization, machine learning, artificial intelligence, maritime transport, environmental impact, maritime safety, cybersecurity.*

ЛІТЕРАТУРА

1. 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(P1). 118638. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118638>
2. Tsoumpris C., Theotokatos G. A decision-making approach for the health-aware energy management of ship hybrid power plants. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023. Vol. 235. 109263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109263>
3. Ge Y., Zhang J., Zhou K., Zhu J., Wang Y. Research on energy management for ship hybrid power system based on adaptive equivalent consumption minimization strategy. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11(7). 1271. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11071271>
4. Choi E., Kim H. Advanced energy management system for generator–battery hybrid power system in ships: a novel approach with optimal control algorithms. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12(10). 1755. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12101755>
5. Tarnapowicz D., German-Galkin S., Nerc A., Jaskiewicz M. Improving the energy efficiency of a ship's power plant by using an autonomous hybrid system with a PMSG. *Energies*. 2023. Vol. 16(7). 3158. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16073158>
6. Tsoumpris C., Theotokatos G. Energy management and health monitoring for hybrid ship power plants. *Journal of Marine Engineering & Technology*. 2025. Vol. 24(4). P. 320-337. DOI <https://doi.org/10.1080/20464177.2025.2518782>
7. Antonopoulos S., Visser K., Kalikatzarakis M., Reppa V. MPC framework for the energy management of hybrid ships with an energy storage system. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9(9). 993. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9090993>
8. Sharko O., Yanenko A. Modeling of intelligent software for the diagnosis and monitoring of ship power plant components using Markov chains. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17946>
9. Choi M., Choi J., Sung D., Jung W. Energy Management Strategies for Hybrid Propulsion Ferry with Different Battery System Capacities. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12(12). 2165. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12122165>
10. Nivolianiti E., Karnavas Y.L., Charpentier J.-F. Fuzzy Logic-Based Energy Management Strategy for Hybrid Fuel Cell Electric Ship Power and Propulsion System. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12(10). 1813. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12101813>

Стаття прийнята 15.08.2025