

АНАЛІЗ ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Поливода В.В.

канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID:
<https://orcid.org/0000-0001-7742-255X>, e-mail: polyvodavv@gmail.com;

Самойлов С.О.

здобувач ступеня PhD, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID:
<https://orcid.org/0009-0006-4454-0510>, e-mail: samoilovserhii.ksma@gmail.com

Робота зосереджена на дослідженні сучасних технологій оптимізації суднових систем електропостачання суден. У ній розглянуто проблеми та фактори, що сприяють прогресу в цій галузі, такі як вплив морської галузі на навколишнє середовище та постійне зростання конкуренції. Наведено приклади найефективніших технологічних досягнень, включаючи світлодіодні системи освітлення, енергоефективні електродвигуни, частотно-регульовані приводи та гібридні джерела живлення. Проаналізовано стратегії, спрямовані на сприяння раціональному та відповідальному споживанню енергії, з ефективним управлінням системами накопичення енергії. Значна увага приділяється інтеграції альтернативних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія, та їх потенціалу для сприяння декарбонізації судноплавства та зменшення залежності від традиційних видів палива. Гібридні рушійні установки, системи рекуперації відпрацьованого тепла та сучасні системи управління енергетичним обладнанням досліджуються як комплексні та інтегровані підходи до оптимізації споживання енергії на судах. Відзначається швидкий розвиток рішень для систем накопичення енергії, таких як літій-іонні акумулятори, які є дуже важливими для забезпечення ефективної та надійної роботи гібридних та повністю електричних суден з єдиною уніфікованою електроенергетичною системою. У статті наведено порівняльний аналіз розглянутих підходів до оптимізації на основі ключових критеріїв, таких як економія палива, рівень скорочення викидів, загальна надійність та економічна доцільність впровадження. Крім того, у статті ілюструється успішне застосування цих стратегій оптимізації на різних типах суден, від малих поромів до великих контейнеровозів та круїзних лайнерів. В окремому розділі представлено огляд останніх наукових досліджень та публікацій у цій галузі, а також майбутні тенденції та напрямки розвитку в оптимізації енергетичних систем суден, включаючи зростаючу роль цифровізації, автоматизації, використання штучного інтелекту, впровадження альтернативних видів палива.

Ключові слова: суднові автоматизовані електроенергетичні системи, енергоефективність, вплив на навколишнє середовище, оптимізація, цифровізація, альтернативні види палива, морський транспорт, електричні судна.

Постановка проблеми

Судноплавство та перевезення вантажів морським шляхом відіграє ключову роль у глобальній економіці. Морська індустрія стикається з нагальною потребою в оптимізації роботи суднових автоматизованих електроенергетичних систем (САЕЕС) для одночасного задоволення зростаючих експлуатаційних вимог, дотримання жорстких екологічних стандартів та мінімізації експлуатаційних витрат. Це зумовлено низкою факторів, серед яких посилення екологічних норм, таких як EU ETS, FuelEU Maritime та суворі вимоги Міжнародної морської організації (ІМО) щодо скорочення викидів CO₂ від суден. Крім того, до тиску конкуренції додається нестабільність цін на паливо, що робить питання оптимізації енергоспоживання особливо актуальним з економічної точки зору. Технології енергоефективності являються ключовим інструментом для досягнення цих цілей, оскільки ефективне використання енергії має значний потенціал для економії палива та зменшення викидів. Існуючі підходи до оптимізації часто мають свої обмеження та недоліки, а зростаюча складність суден з енергоємними системами вимагає розробки та впровадження більш інтегрованих та ефективних підходів до управління енергією [1].

Таким чином, дослідження та впровадження сучасних технологій, пов'язаних з САЕЕС, є вкрай важливим для забезпечення екологічної безпеки та економічної ефективності морського транспорту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасні дослідження в галузі розвитку САЕЕС демонструють значний інтерес до підвищення енергоефективності, зменшення викидів та інтеграції новітніх технологій. Аналіз наукових публікацій показує, що науковці підходять до цієї задачі з різних сторін, від моделювання та оптимізації існуючих систем до розробки та впровадження нових рішень.

Одним з ключових напрямків є створення та оптимізація моделей САЕЕС. Використовуються як фізичні моделі, так і керовані даними підходи для аналізу продуктивності. Фізичне моделювання базується на математичних рівняннях, що описують поведінку компонентів системи, в той час як кероване даними моделювання використовує машинне навчання для прогнозування та оптимізації на основі зібраних даних. Застосування таких інструментів, як діаграми Санкея, допомагає візуалізувати потоки енергії та виявляти області найбільших втрат для їх подальшої оптимізації [1].

Значна увага приділяється питанню оптимального використання енергії та розробці ефективних стратегій її використання. Розглядаються різні технології, які спрямовані на мінімізацію споживання палива. Наприклад, сучасні системи управління енергією (EMS) на основі оптимізаційних алгоритмів забезпечують значну економію палива та зменшення викидів. Також широко розповсюджуються системи, основані на гібридних пропульсивних установках та інтелектуальному керуванні [2, 3].

Іншим важливим напрямком є інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія, разом з системами зберігання енергії. Дослідження спрямовані на розробку ефективних способів використання цих джерел для живлення бортових систем, підтримки пропульсії та зменшення залежності від традиційних видів палива.

Крім того, розглядаються технології утилізації відпрацьованого тепла, наприклад, такі як котли-утилізатори та системи органічного циклу Ренкіна, як засоби підвищення загальної енергоефективності судна.

Останні публікації також підкреслюють важливість цифровізації та використання штучного інтелекту для оптимізації суднових енергетичних систем. Технологія цифрових двійників та алгоритми машинного навчання можуть бути використані для прогнозування енергоспоживання, оптимізації роботи обладнання та прийняття більш оптимальних рішень щодо управління енергією [4].

Незважаючи на постійний та значний прогрес, дослідження також виявляють певні обмеження та виклики. До них належать обмежене використання керованих даними моделей для оптимізації, недостатня експериментальна валідація моделей, а також необхідність врахування невизначеності та проведення комплексної багатокритеріальної оптимізації, що охоплює основні важливі питання, включаючи витрати, викиди, надійність та безпеку. Також одна з основних глобальних проблем полягає у складності інтеграції нових підходів та технологій з вже існуючим обладнанням.

Мета статті

Мета даної роботи полягає у проведенні аналізу сучасних технологій, дотичних до роботи САЕЕС. В рамках дослідження розглянуто досягнення в цій сфері, експлуатаційні стратегії, інтеграцію альтернативних джерел енергії та використання передових систем управління енергією. Особливу увагу приділено виявленню переваг та недоліків кожної з розглянутих технологій, а також аналізу їхньої потенційної ефективності та можливостей застосування на різних типах суден.

Виклад основного матеріалу

Оптимізація суднових електроенергетичних систем може бути досягнута за допомогою різноманітних

шляхів, які можна умовно поділити на кілька категорій.

До *технологічних досягнень* належить впровадження більш ефективних компонентів та систем. Прикладами є високоефективне світлодіодне освітлення та електродвигуни, приводи зі змінною частотою (VFD) для контролю швидкості, енергоефективні трансформатори та інтеграція передових акумуляторних технологій.

Експлуатаційні стратегії зосереджуються на оптимізації способу експлуатації та управління існуючими системами. Вони охоплюють такі практики, як ефективна зарядка та управління акумуляторами, відповідальне споживання енергії, інструменти для контролю пікових навантажень та оптимізація швидкості судна на основі міркувань енергоефективності.

Інтеграція альтернативних джерел енергії передбачає включення відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна енергія та вітрова енергія, до енергетичного балансу судна. Ця стратегія акцентує особливу увагу на розвитку та впровадженні рішень із накопичення енергії, що забезпечує резервування цих переривчастих джерел.

Системна оптимізація охоплює підходи, які розглядають всю суднову енергетичну систему цілісно. До цієї категорії належать гібридні пропульсивні установки, оскільки вони передбачають інтеграцію кількох джерел енергії. Системи утилізації відпрацьованого тепла також є прикладом системної оптимізації шляхом використання вторинної енергії. Передові системи управління енергією (EMS) мають вирішальне значення для координації та оптимізації роботи цих складних систем.

Стратегії цифровізації будуються на основі автоматизованих систем моніторингу та керування САЕЕС, використанні моделей штучного інтелекту (ШІ) для аналізу даних в реальному часі, прийнятті рішень для оптимального налаштування та прогнозування майбутнього стану системи для можливості адаптивної конфігурації.

Багаторівневий підхід до оптимізації, що охоплює окремі компоненти, експлуатацію, альтернативні джерела енергії та інтелектуальні системи керування, є ключем до збільшення рівня ефективності систем. Оптимізація лише окремого компонента може дати обмежені результати без урахування загальної роботи системи та потенціалу інтеграції альтернативних джерел.

Огляд сучасних технологій, спрямованих на підвищення ефективності САЕЕС.

Системи берегового живлення суден (STS) дозволяють суднам підключатися до берегової електричної мережі під час стоянки в порту, що дає змогу вимкнути їхні допоміжні дизель-генератори та підзарядити акумулятори (рис. 1). Основна мета цієї технології полягає у ліквідації місцевих шкідливих викидів. Важливим питанням є забезпечення сумісності між електричною системою судна та береговим живленням відносно напруги та частоти струму. І хоча процес глобальної

стандартизації по цим параметрам розвивається, але різноманіття конфігурацій на різних судах ще велике. Тому для рішення цієї проблеми ведуться активні роботи зі сторони берегової частини STS, додаючи опції автоматичної адаптації параметрів берегової мережі до параметрів обладнання на судні [5].

Переваги. Використання STS може призвести до зниження витрат, оскільки берегова електроенергія

часто дешевша за енергію, вироблену на борту судна. З вимкненими генераторами судна полегшується виконання ремонтних робіт. Система може забезпечити двостороннє перетворення енергії, що дозволяє передавати енергію з берега на судно і навпаки. І основна перевага це зменшення забруднення навколишнього середовища та шуму в портових зонах.

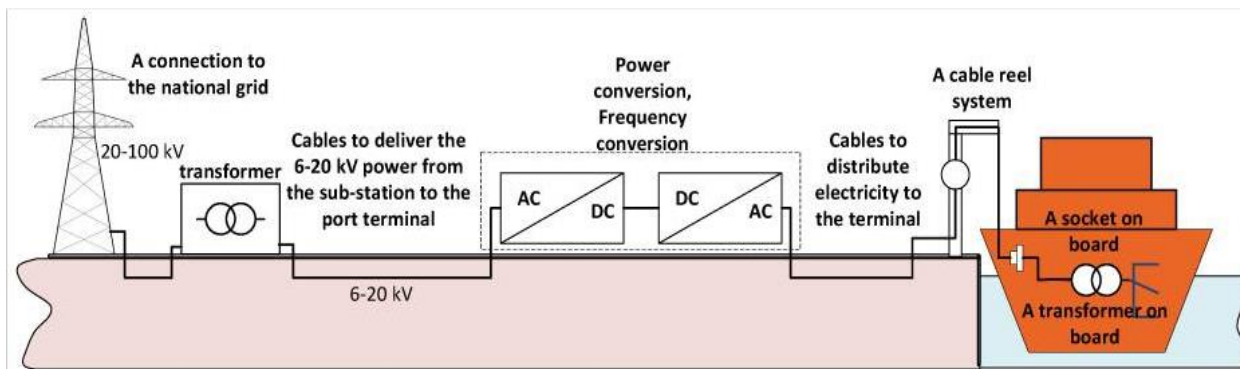


Рис. 1 – Схема роботи системи берегового живлення судна

Недоліки та обмеження. Впровадження необхідної інфраструктури в портах та модернізація суден несуть у собі значні фінансові витрати. Також складності додають технічні проблеми із забезпеченням узгодження напруги та частоти струму. STS застосовується переважно під час стоянки суден, а не під час навігації. У випадку, якщо берегова мережа значною мірою залежить від викопного палива, загальне скорочення негативного впливу на навколишнє середовище може бути менш значним.

Приклади застосування. STS часто використовуються контейнеровозами та пасажирськими суднами. Законодавство ЄС вимагає використання цієї технології для цих типів суден у портах ЄС з 2030 року [5]. Окрім цього, серед користувачів STS часто зустрічаються газозводи СПГ, танкери, пороми та мега-яхти. STS також часто використовується на електричних та гібридних судах для заряджання акумуляторів.

Зростаючий регуляторний тиск та збільшення кількості портів, що впроваджують інфраструктуру STS, свідчать про чітку тенденцію до її розширення. Однак технічні та економічні проблеми потребують їх вирішення шляхом стандартизації та впровадження технологічних досягнень для забезпечення глобального безперебійного та ефективного використання STS.

Підвищення енергоефективності за допомогою передових технологій.

Високоєфективне освітлення та електродвигуни. Заміна традиційних ламп розжарювання та люмінесцентних ламп на світлодіодне освітлення забезпечує значну економію енергії та набагато рідше потребує заміни. Енергоефективні електродвигуни зменшують втрати енергії (втрати в залізі, втрати в статорі та роторі, втрати на тертя) та вимагають менших витрат на

обслуговування. Електронні плавні пускачі забезпечують плавне прискорення та гальмування двигунів, зменшуючи пошкодження обмоток та підшипників, тим самим збільшуючи термін служби двигуна. Системи рекуперації ковзної потужності покращують контроль швидкості асинхронних двигунів з фазним ротором, збираючи надлишкову потужність ковзання та передаючи її на вал двигуна як механічну чи електричну енергію [5].

Приводи змінної частоти (VFD) використовуються для контролю швидкості та крутного моменту електродвигунів змінного або постійного струму шляхом регулювання напруги та вхідної частоти. Переваги включають миттєвий запуск без затримки нагріву, контрольований та плавний пуск, точне керування процесами та мінімізацію механічного зносу. VFD застосовуються в різних бортових системах, таких як насоси охолодження морської води, живильні насоси котлів, насоси HVAC, водовідливні насоси, вентилятори машинного відділення та рефрижераторні контейнери. Ця технологія пропонує значний потенціал енергозбереження, із зниженням витрат до 60% [6-8].

Енергоефективні трансформатори, в конфігурації з аморфним осердям, можуть зменшити втрати енергії приблизно на 70% порівняно зі звичайними трансформаторами. Вони також підтримують високу ефективність при низьких навантаженнях. Електронні пускорегулювальні пристроїв, що використовуються разом з люмінесцентними лампами, контролюють пускову напругу та робочий струм, підвищуючи ефективність за рахунок усунення мерехтіння та зменшення споживання енергії до 40% за рахунок роботи на вищій частоті (40-50 кГц замість 60 Гц) [6].

Системи утилізації відпрацьованого тепла вловлюють теплову енергію з вихлопних газів та охолоджуючої води, підвищуючи загальну ефективність системи та зменшуючи споживання палива. Рекупероване тепло може використовуватися для різних бортових потреб, таких як підігрів бункерного палива, опалення приміщень судна, виробництво прісної води та навіть генерації електроенергії. Найпоширенішим пристроєм є утилізаційний котел (EGB), який виробляє пару, пропускаючи вихлопні гази через теплообмінник. За допомогою термоелектричних генераторів теплова енергія перетворюється в електричну. Гібридні турбокомпресори використовують енергію вихлопних газів для обертання компресора, а також виробляють електроенергію через вбудований генератор [6].

Різноманітність технологій та застосувань для утилізації відпрацьованого тепла демонструє її значний потенціал для підвищення енергоефективності в морській галузі.

Передові системи управління енергією (EMS) забезпечують інтелектуальний контроль потоку енергії в складних судових електроенергетичних системах, особливо в тих, що мають кілька джерел енергії. Ці системи оптимізують виробництво, розподіл та споживання енергії на основі даних у реальному часі та експлуатаційних вимог, маючи на меті мінімізацію споживання палива, зменшення викидів та підвищення надійності системи. EMS є важливими для управління складними взаємодіями між різними джерелами енергії на гібридних судах, забезпечуючи найефективніше використання кожного компонента. Вони відіграють ключову роль в оптимізації інтеграції переривчастих відновлюваних джерел енергії з системами зберігання енергії, забезпечуючи стабільне та надійне енергопостачання.

Сучасні EMS використовують аналітику даних, можливість прогнозування та передові алгоритми оптимізації, переходячи від простих систем на основі правил до більш динамічних та контекстно-залежних стратегій управління енергією, які можуть адаптуватися до мінливих умов та оптимізувати продуктивність у реальному часі [2, 9].

Інтеграція відновлюваних джерел енергії. Сонячна енергія набуває популярності, як ефективне, екологічно чисте, безшумне та безвикидне джерело енергії. Її можна використовувати для різних цілей: живлення бортових систем, заряджання акумуляторів і навіть для сприяння пропульсії в деяких випадках. В світі вже є поромі та вантажні судна, де основною генерацією енергії є сонячна. Також з розвитком технологій збільшується значення морських сонячних електростанцій. Майбутні напрямки розвитку включають розробку надлегких панелей та самоочисного покриття для підвищення практичності в морських умовах.

Основні проблеми представлені переривчастим характером сонячної генерації, обмеженістю простору на судах та початковими інвестиційними витратами на панелі та системи інтеграції.

Досліджуються різні технології *вітрової* допомоги пропульсії, включаючи роторні вітрила (які використовуються Anemoi Marine для суден Berge Bulk), жорсткі крилові системи (такі як WindWings від BAR Technologies) та навіть невеликі вітрогенератори для вітрильників. Ці технології забезпечують значну економію палива та скорочення викидів. Вітрова пропульсія може знизити шкідливі викиди на певних маршрутах на 28%. Тому модернізація існуючих суден за допомогою технологій вітрової допомоги є складним, специфічним але перспективним напрямком. Ключові фактори включають наявність вітру на маршруті судна та інтеграцію цих систем з існуючими пропульсивними та енергетичними системами [6].

Активна розробка та зростаюче впровадження як сонячної, так і вітрової енергії в морській галузі свідчать про потужний рух до декарбонізації та зменшення залежності від традиційних викопних видів палива. Процес подолання обмежень, таких як вага панелей, ефективність у морських умовах та проблеми з наявністю вітру та сонця в конкретний час, спрямований на те, щоб зробити рішення з відновлюваних джерел енергії більш практичними та ефективними для широкого впровадження в судноплавстві.

Водень став перспективним альтернативним паливом для морського транспорту завдяки своєму потенціалу нульових викидів при виробництві з відновлюваних джерел. Існує два основних типи судових енергетичних систем, що використовують водень як паливо: системи які використовують водневі паливні елементи та водневі двигуни внутрішнього згоряння.

Водневі паливні елементи перетворюють хімічну енергію водню та кисню в електричну енергію, а єдиними побічними продуктами є вода та тепло.

Водневі двигуни внутрішнього згоряння (HICE) спалюють водень у камері згоряння для виробництва енергії, подібно до традиційних двигунів внутрішнього згоряння.

Водневі паливні елементи, мають вищу енергетичну ефективність, ніж традиційні двигуни внутрішнього згоряння, особливо при низьких навантаженнях. Ефективність паливних елементів може сягати 65%, порівняно з 33-35% для традиційних електростанцій на основі згоряння.

До основних недоліків використання водню відносяться проблеми зберігання, транспортування та необхідність додаткової портової інфраструктури. Водень має низьку об'ємну енергоємність порівняно з традиційними видами палива, що вимагає значно більших паливних баків для досягнення порівнянних запасів ходу. Транспортування водню у великих обсягах, необхідних для судноплавства, може бути складним і дорогим як у вигляді стиснутого газу, так і в рідкому стані. Рідкий водень вимагає криогенних температур, що збільшує енергетичні та вартісні витрати на транспортування. До того ж водень є легкозаймистим газом з широким діапазоном займистості (4-75% в повітрі) та низькою енергією займання. Це вимагає суворих

заходів безпеки та спеціалізованого обладнання для запобігання витокам та мінімізації ризиків [7, 10].

Розвиток мережі водневих заправних станцій у портах є вирішальним фактором для широкого впровадження суден, що працюють на водні, і це вимагає значних інвестицій та розвитку інфраструктури.

Гібридні пропульсивні системи поєднують традиційні двигуни внутрішнього згоряння з електродвигунами та системами зберігання енергії для оптимізації роботи двигуна та зменшення викидів. Відомі сучасні конфігурації складаються з дизель-електричних систем, де дизельні генератори виробляють енергію для живлення електродвигунів, які вже забезпечують пропульсію, та акумуляторних систем, які використовують збережену енергію для доповнення або заміни потужності основного генератора в певних режимах роботи. Гібридні системи зазвичай керуються системами EMS та пропонують різноманітні режими роботи, такі як резерв оборотної (реверсивної) потужності (reversible power, використання акумулятора замість додаткового генератора), зелений режим (робота з нульовими викидами з використанням лише акумуляторної енергії) та режим старт-стоп (використання акумуляторної енергії при низьких неоптимальних навантаженнях двигуна) [4, 6, 11].

Забезпечуючи роботу двигунів в оптимальних режимах, гібридні системи значно підвищують ефективність використання палива. Використання акумуляторної енергії для пропульсії або неоптимальних навантажень призводить до зменшення викидів, особливо в режимах з нульовими викидами в портових зонах або

екологічно чутливих районах. Електродвигуни забезпечують миттєвий крутний момент та точне керування, покращуючи маневреність суден, особливо у вузьких місцях або під час операцій динамічного позиціонування. Гібридні системи збільшують гнучкість в управлінні енергією та резервування у випадку відмови двигуна або мотора.

Гібридна пропульсія впроваджується на широкому спектрі типів суден, включаючи пороми (Finnlines, Brittany Ferries), танкери, буксири (Maersk Minder, Rawabi 324), балкери (Aasen Shipping, Misje Vita), круїзні судна, яхти та інші. У декількох випадках було зафіксовано значну економію палива, наприклад, до 40% для гібридного балкера Misje Vita. Модернізація існуючих суден гібридними системами також стає все більш поширеною, про що свідчать гібридні оновлення Wärtsilä HY для Harvey Gulf International Marine та Maersk Minder.

Здатність гібридних систем працювати в різних режимах забезпечує індивідуальний підхід до енергоефективності та зменшення викидів залежно від конкретних умов роботи судна.

Порівняльний аналіз сучасних технологій.

Як показано у таблиці 1, економічні переваги та компроміси між напрямками підвищення ефективності цілком очевидні. Наприклад, технології з високим потенціалом економії палива та зменшення викидів часто мають вищі початкові інвестиційні витрати. Вибір конкретних технологій або їх поєднання має бути адаптований до конкретних характеристик та експлуатаційних потреб різних типів суден.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз сучасних технологій на основі ключових параметрів: економія палива, зменшення викидів, надійність та вартість впровадження

Технологія	Економія палива	Зменшення викидів	Надійність	Вартість
Берегове живлення суден (STS)	висока (в порту)	значне (в порту)	залежить від інфраструктури	висока
LED освітлення, електродвигуни	низька/середня	низьке/середнє	підвищена	низька/середня
Приводи змінної частоти (VFD)	середнє/висока	середнє/високе	підвищена	середня
Гібридна пропульсія	середнє/високе	середнє/висока	підвищена резервування	висока
Водень	середнє/високе	високе	середня	висока
Відновлювана енергія (сонячна та вітрова)	низька до високої (залежно від застосування та умов)	значне (залежить від погоди та конструкції системи)	підвищена	середня/висока
Передові системи управління енергією (EMS)	середня до високої (забезпечує роботу інших напрямів)	середнє/висока (забезпечує роботу інших напрямів)	підвищена (за рахунок кращого контролю)	середня/висока
Системи утилізації відпрацьованого тепла	середня	середнє	підвищена	середня/висока

Круїзні судна. Високе енергоспоживання, часті заходи в порти роблять STS, гібридну пропульсію, утилізацію відпрацьованого тепла та енергоефективні системи (освітлення, HVAC) дуже актуальними.

Контейнеровози. Довгі рейси в морі роблять доцільними повільне плавання (експлуатаційне), оптимізацію корпусу, утилізацію відпрацьованого тепла та потенційно вітрову пропульсію. STS є важливою ланкою енергосистеми під час стоянок у портах.

Пороми. Часті заходи в порти та потенційно коротші маршрути роблять гібридну або навіть повністю електричну пропульсію із заряджанням від берега (STS) ефективним варіантом.

Буксири. Високі коливання навантаження та періоди очікування роблять вигідними гібридні або повністю електричні рішення.

Військові судна. Сценарії використання військових суден спрямовані на максимізацію надійності, автономності та швидкості усунення пошкоджень, навіть шляхом збільшення витрат чи шкідливих викидів. Важливість швидкості маневрування також виходять на перший план у деяких сценаріях. Тому використання гібридних систем, резервних джерел живлення та інтелектуального керування (EMS) є вдалим рішенням.

Порівняльний аналіз показує, що не існує єдиного універсального варіанту. Ідеальний підхід передбачає комбінацію стратегій, адаптованих до конкретного типу судна, його експлуатаційного профілю та пріоритетів власника щодо витрат, викидів та надійності.

Тенденції та напрямки розвитку САЕЕС.

Штучний інтелект являє собою швидкозростаючу технологію, яка знаходить застосування практично в усіх сферах нашого життя. Здатність ШІ аналізувати великі обсяги даних, виявляти закономірності та приймати інтелектуальні рішення відкриває значні перспективи для покращення роботи САЕЕС. Використання алгоритмів машинного навчання, нейронних мереж та експертних систем може призвести до підвищення надійності, зниження експлуатаційних витрат та покращення енергоефективності в морській галузі. Вже зараз ШІ знаходить конкретне застосування для оптимізації різних аспектів роботи суднових електричних систем [12].

Покращена навігація. Компанія Orca AI вже інтегрує моделі штучного інтелекту у навігаційні системи.

Ці рішення використовують комп'ютерний зір та різноманітні датчики для надання екіпажам суден у режимі реального часу уявлення про їхнє оточення. Це значно полегшує задачу персоналу, особливо в умовах поганої видимості або в водах з щільним трафіком. До того ж системи можуть автономно відслідковувати інші судна чи об'єкти і попереджати про ризики зіткнення.

Прогнозування відмов обладнання. Алгоритми машинного навчання використовуються для аналізу даних датчиків (температури, вібрації, електричного розряду) в реальному часі з метою прогнозування відмов генераторів, двигунів, акумуляторів та іншого

обладнання. Також ці технології допомагають передбачити, коли конкретні деталі потребуватимуть обслуговування. Цифрові двійники дозволяють моделювати весь шлях експлуатації судна та прогнозувати знос обладнання [13, 14].

Оптимізація енергоспоживання. ШІ-системи використовуються для оптимізації маршрутів суден з урахуванням погодних умов, течій та характеристик судна для мінімізації споживання палива. Наприклад, компанія Maersk використовує інструмент ШІ для оптимізації маршрутів судноплавства та швидкості суден, мінімізуючи споживання палива та викиди. Системи ШІ також застосовуються для динамічного управління енергією та оптимізації розподілу енергії на борту. Рішення ABB Ability™ OptimE використовує накопичені дані для вивчення залежності між швидкістю судна та кутом повороту гвинта з метою оптимізації ефективності рушійної установки, зменшення споживання енергії та мінімізації викидів [12].

Керування навантаженням. Алгоритми ШІ використовуються для оптимального планування завантаження та розміщення вантажу на суднах з метою максимізації використання простору та забезпечення стійкості, що опосередковано впливає на електричне навантаження. Програмне забезпечення NanoPredict AI може балансувати різні джерела живлення для оптимізації використання зеленої енергії та зменшення залежності від генераторів під час низьких навантажень [12].

Інтеграція альтернативних видів палива та їх вплив на електричні системи. Перехід на альтернативні види палива, такі як водень, кардинально вплине на екологічну ефективність САЕЕС. Водень є багатообіцяючим паливом для декарбонізації морського сектору завдяки його потенціалу нульових викидів при виробництві з відновлюваних джерел. Водневі паливні елементи пропонують високу ефективність, безшумну роботу та відсутність викидів (крім води), тоді як водневі двигуни внутрішнього згоряння забезпечують потенційну сумісність з існуючими технологіями.

Розвиток потужніших та ефективніших технологій зберігання енергії. Використання в акумуляторних технологіях нових хімічних складів, таких як літій-залізо-фосфатні (LFP) та літій-титанатні (LTO), пропонують переваги щодо терміну служби, маси та вартості.

Перспективи розвитку оптимізації суднових енергетичних систем нерозривно пов'язані з ширшими тенденціями цифровізації, автоматизації та переходу до чистіших видів палива. Розвиток цієї сфери стимулюватимуть розробку та впровадження більш складних та інтегрованих рішень.

Технології зберігання енергії відіграватимуть дедалі важливішу роль у забезпеченні впровадження як відновлюваних джерел енергії, так і гібридних пропульсивних установок, виступаючи ключовим фактором для чистішого та ефективнішого судноплавства.

Перспективи подальших досліджень. Дослідження в цій галузі можуть бути продовжені в декількох перспективних напрямках.

По-перше це питання синтезу сучасних САЕЕС та систем штучного інтелекту, побудова моделі, мережі датчиків та основних алгоритмів взаємодії.

По-друге, це створення цифрових двійників та емуляторів таких систем, їх оптимізація та аналіз потенційної ефективності в розрізі ключових параметрів.

По-третє, це оцінка ризиків збільшення відсотку автоматизації на судні, побудова процесу кібербезпеки та опрацювання аварійних режимів.

Також дуже важливо приділити увагу моральним та правовим питанням ролі штучного інтелекту в галузі та допустимого рівня його автономності.

Висновки

Проведений аналіз сучасних шляхів оптимізації роботи суднових електроенергетичних систем виявив широкий спектр технологій та стратегій, спрямованих на підвищення енергоефективності та зменшення екологічного впливу морського транспорту. Берегове живлення суден є ефективним рішенням для значного скорочення викидів та шуму в портових зонах, дозволяючи суднам використовувати більш чисту берегову електроенергію замість суднових дизель-генераторів. Однак його широке впровадження залежить від розвитку портової інфраструктури та стандартизації.

Технологічні досягнення, такі як високоефективне світлодіодне освітлення та електродвигуни, а особливо електричні приводи змінної частоти (VFD), пропонують значний потенціал для зниження енергоспоживання в бортових системах, забезпечуючи економію енергії до 60% у деяких застосуваннях. Інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія, хоча і стикається з проблемами переривчастості та обмеженості простору, демонструє зростаючу перспективність у зменшенні залежності від вичерпного палива.

Гібридні пропульсивні системи забезпечують значну економію палива, зменшення викидів та покращену маневреність, що підтверджується численними прикладами їх успішного впровадження на різних типах суден. Системи утилізації відпрацьованого тепла, такі як котли-утилізатори та системи органічного циклу Ренкіна, дозволяють ефективно використовувати теплову енергію, яка інакше була б втрачена, підвищуючи загальну ефективність судна.

Ключову роль у координації та оптимізації роботи всіх цих складових енергосистем судна відіграють передові системи управління енергією (EMS), які на основі даних у реальному часі та інтелектуальних алгоритмів забезпечують мінімізацію споживання палива та викидів. Сучасні акумулятори є важливим елементом багатьох сучасних рішень з оптимізації, забезпечуючи ефективне зберігання енергії для гібридних

систем, роботи з нульовими викидами та управління піковими навантаженнями.

Перехід до альтернативних видів палива (водень) та альтернативних джерел енергії (сонячна та вітрова генерація) вимагатиме інтеграції нових технологій в електричні системи суден та додаткових витрат. Але погіршення екологічної ситуації не залишає вибору, окрім продовження досліджень в цій галузі.

Порівняльний аналіз показав, що вибір оптимального поєднання технологій залежить від конкретного типу судна, його умов експлуатації та пріоритетів судновласника. Майбутні тенденції в галузі оптимізації суднових енергетичних систем тісно пов'язані з цифровізацією та автоматизацією, що дозволить досягти більш точного управління та прогнозування енергоспоживання.

Також особливу увагу потрібно звернути на зростаючий потенціал штучного інтелекту для оптимізації роботи САЕЕС. Впровадження ШІ дозволить підвищити надійність обладнання, знизити експлуатаційні витрати, покращити енергоефективність та підвищити рівень безпеки судноплавства. Незважаючи на існуючі виклики та обмеження, такі як необхідність у великих обсягах якісних даних, забезпечення кібербезпеки та надійності систем в суворих морських умовах, активні дослідження та розробки в цій галузі свідчать про значний прогрес.

Таким чином, майбутнє ефективних суднових електроенергетичних систем полягає в інтегрованому застосуванні ряду сучасних технологій та стратегій, адаптованих до конкретних потреб кожного судна. Постійні дослідження та інновації в цій галузі є критично важливими для досягнення екологічної безпеки та економічної ефективності морського транспорту.

Перелік використаних джерел

- [1] Hüffmeier J., Johanson M. State-of-the-Art Methods to Improve Energy Efficiency of Ships. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9(4). Article 447. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9040447>.
- [2] Mylonopoulos F., Polinder H., Coraddu A. A Comprehensive Review of Modeling and Optimization Methods for Ship Energy Systems. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. Pp. 32697–32707. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3263719>.
- [3] Optimization-Based Power and Energy Management System in Shipboard Microgrid: A Review / P. Xie et al. *IEEE Systems Journal*. 2022. Vol. 16(1). Pp. 578–590. DOI: <https://doi.org/10.1109/jsyst.2020.3047673>.
- [4] Hong S. H., Kim D. M., Kim S. J. Power Control Strategy Optimization to Improve Energy Efficiency of the Hybrid Electric Propulsion Ship. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. Pp. 22534–22545. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3364374>.
- [5] German-Galkin S., Tarnapowicz D. Energy Optimization of the ‘Shore to Ship’ System - A Universal Power

- System for Ships at Berth in a Port. *Sensors*. 2020. Vol. 20(14). Article 3815. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20143815>.
- [6] Animah I., Adjei P., Djamesi E.K. Techno-economic feasibility assessment model for integrating hybrid renewable energy systems into power systems of existing ships: A case study of a patrol boat. *Journal of Marine Engineering & Technology*. 2022. Vol. 22(1). Pp. 22–37. DOI: <https://doi.org/10.1080/20464177.2022.2087272>.
- [7] Enhancing renewable energy utilization and energy management strategies for new energy yachts / Z. Wang et al. *Heliyon*. 2024. Vol. 10(18). Article e37863. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37863>.
- [8] İnal Ö.B., Koçak G. A Case Study on the Variable Frequency Drive for Ship Engine Room Ventilation. *Marine Science and Technology Bulletin*. 2023. Vol. 12(3). Pp. 252-258. DOI: <https://doi.org/10.33714/masteb.1299692>.
- [9] Scenario- and Optimization-Based Control of Marine Electric Power Systems. URL: <https://torarnj.folk.ntnu.no/tib.pdf> (дата звернення: 26.03.2025).
- [10] Challenges in the use of hydrogen for maritime applications / L. Van Hoecke. *Energy & Environmental Science*. 2021. Vol. 14(2). Pp. 815-843. DOI: <https://doi.org/10.1039/d0ee01545h>.
- [11] Seven fascinating hybrid ship trends that everyone needs to know about. URL: <https://www.wartsila.com/insights/article/seven-fascinating-hybrid-ship-trends-that-everyone-needs-to-know-about> (дата звернення: 26.03.2025)
- [12] Ways AI is Quietly Taking Over the Shipping Industry. URL: <https://www.shipuniverse.com/15-ways-ai-is-quietly-taking-over-the-shipping-industry/> (дата звернення: 26.03.2025)
- [13] Riyadh M. Transforming the Shipping Industry with Autonomous Ships and Artificial Intelligence. *Maritime Park Journal of Maritime Technology and Society*. 2024. Vol. 3(2). Pp. 80-85. DOI: <https://doi.org/10.62012/mp.v3i2.35386>.
- [14] Artificial Intelligence in Maritime Transportation: A Comprehensive Review of Safety and Risk Management Applications / Durluk I., Miller T., Kostecka E., Tuński T. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14(18). Article 8420. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14188420>.

ANALYSIS OF THE IMPLEMENTATION OF MODERN TECHNOLOGIES TO INCREASE THE EFFICIENCY OF SHIP ELECTRIC POWER SYSTEMS

Polyvoda V.V.

PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7742-255X>, e-mail: polyvodavv@gmail.com;

Samoilov S.

postgraduate student, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4454-0510>, e-mail: samoilovserhii.ksma@gmail.com

The work focused on research of current technologies for optimizing shipboard electrical power systems. It examined the challenges and factors driving progress in this field, such as the negative impact of the maritime industry on the environment and the constant growth of competition. Examples of the most effective technological advances are provided, including LED-based lighting systems, energy-efficient electric motors, variable frequency drives, and hybrid power sources. The strategies aimed at promoting rational and conscious energy consumption, with the effective management of energy storage systems are analysed. Significant attention is dedicated to the integration of alternative energy sources, such as solar and wind power and their potential to contribute to the decarbonization of shipping and reduce dependence on traditional fuels. Hybrid propulsion systems, waste heat recovery systems and advanced energy management are explored as comprehensive and integrated approaches to optimizing energy consumption on vessels. The rapid development of energy storage solutions, such as lithium-ion batteries, is noted, which are very important in ensuring the efficient and reliable operation of hybrid and fully electric ships. The article provides a comparative analysis of the considered optimization approaches based on key criteria, such as fuel economy, emission reduction level, overall reliability and economic feasibility of implementation. In addition, the article illustrates the successful application of these optimization strategies on different types of ships, ranging from small ferries to large container ships and cruise liners. A separate section presents an overview of the latest scientific research and publications in this field and future trends and development directions in ship power system optimization including the growing role of digitalization, automation, the use of artificial intelligence, the adoption of alternative fuels.

Keywords: ship power systems, energy efficiency, environmental impact, optimization, digitalization, alternative fuels, maritime transport, electric vessels.

References

- [1] J. Hüffmeier, and M. Johanson, "State-of-the-Art Methods to Improve Energy Efficiency of Ships," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9(4), 447, 2021. doi: [10.3390/jmse9040447](https://doi.org/10.3390/jmse9040447).
- [2] F. Mylonopoulos, H. Polinder, and A. Coraddu, "A Comprehensive Review of Modeling and Optimization Methods for Ship Energy Systems," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 32697-32707, 2023. doi: [10.1109/access.2023.3263719](https://doi.org/10.1109/access.2023.3263719).
- [3] P. Xie et al, "Optimization-Based Power and Energy Management System in Shipboard Microgrid: A Review," *IEEE Systems Journal*, vol. 16(1), pp. 578-590, 2022. doi: [10.1109/jsyst.2020.3047673](https://doi.org/10.1109/jsyst.2020.3047673).
- [4] S.H. Hong, D.M. Kim, and S.J. Kim, "Power Control Strategy Optimization to Improve Energy Efficiency of the Hybrid Electric Propulsion Ship," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 22534-22545, 2024. doi: [10.1109/access.2024.3364374](https://doi.org/10.1109/access.2024.3364374).
- [5] S. German-Galkin, and D. Tarnapowicz, "Energy Optimization of the 'Shore to Ship' System - A Universal Power System for Ships at Berth in a Port," *Sensors*, vol. 20(14), article 3815, 2020. doi: [10.3390/s20143815](https://doi.org/10.3390/s20143815).
- [6] I. Animah, P. Adjei, and E. K. Djamesi, "Techno-economic feasibility assessment model for integrating hybrid renewable energy systems into power systems of existing ships: A case study of a patrol boat," *Journal of Marine Engineering & Technology*, vol. 22(1), pp. 22-37, 2022. doi: [10.1080/20464177.2022.2087272](https://doi.org/10.1080/20464177.2022.2087272).
- [7] Z. Wang, M. Li, N. Cao, P. Liao, Y. Ji, and F. Han, "Enhancing renewable energy utilization and energy management strategies for new energy yachts," *Heliyon*, vol. 10(18), article e37863, 2024. doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e37863](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37863).
- [8] Ö.B. İnal, and G. Koçak, "A Case Study on the Variable Frequency Drive for Ship Engine Room Ventilation," *Marine Science and Technology Bulletin*, vol. 12(3), pp. 252-258, 2023. doi: [10.33714/masteb.1299692](https://doi.org/10.33714/masteb.1299692).
- [9] Scenario- and Optimization-Based Control of Marine Electric Power Systems. [Online]. Available: <https://toramj.folk.ntnu.no/tib.pdf>. Accessed on: March 26, 2025.
- [10] L. Van Hoecke, L. Laffineur, R. Campe, P. Perreault, S.W. Verbruggen, and S. Lenaerts, "Challenges in the use of hydrogen for maritime applications," *Energy & Environmental Science*, vol. 14(2), pp. 815-843, 2021. doi: [10.1039/d0ee01545h](https://doi.org/10.1039/d0ee01545h).
- [11] Seven fascinating hybrid ship trends that everyone needs to know about. [Online]. Available: <https://www.wartsila.com/insights/article/seven-fascinating-hybrid-ship-trends-that-everyone-needs-to-know-about>. Accessed on: March 26, 2025.
- [12] 15 Ways AI is Quietly Taking Over the Shipping Industry. [Online]. Available: <https://www.shipuniverse.com/15-ways-ai-is-quietly-taking-over-the-shipping-industry/>. Accessed on: March 26, 2025.
- [13] M. Riyadh, "Transforming the Shipping Industry with Autonomous Ships and Artificial Intelligence," *Maritime Park Journal of Maritime Technology and Society*, vol. 3(2), pp. 80-85, 2024. doi: [10.62012/mp.v3i2.35386](https://doi.org/10.62012/mp.v3i2.35386).
- [14] I. Durlík, T. Miller, E. Kostecka, and T. Tuński, "Artificial Intelligence in Maritime Transportation: A Comprehensive Review of Safety and Risk Management Applications," *Applied Sciences*, vol. 14(18), 8420, 2024. doi: [10.3390/app14188420](https://doi.org/10.3390/app14188420).

Стаття надійшла 24.04.2025

Стаття прийнята 05.06.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Поливода В. В., Самойлов С. О. Аналіз впровадження сучасних технологій для підвищення ефективності суднових електроенергетичних систем. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 188-196. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344905>.