

© Гончарук І.П.

УДОСКОНАЛЕННЯ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУДЕН НА ОСНОВІ ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

У сучасних умовах посилення вимог до енергоефективності та екологічної безпеки морського транспорту актуальним є удосконалення методів оцінювання ефективності використання енергетичних ресурсів суден торговельного флоту. Існуючі підходи, зокрема показники EEDI, EEOI та СІІ, здебільшого орієнтовані на узагальнені або проєктні характеристики і не забезпечують можливості кількісного визначення прихованих резервів енергозбереження в судових енергетичних системах. Метою дослідження є розроблення методичних основ оцінювання енергоефективності суден на основі визначення потенціалу енергозбереження з урахуванням технічних, експлуатаційних та економічних факторів. У роботі проведено аналіз сучасних наукових підходів до оцінювання енергоефективності суден та визначено їх обмеження в умовах змінних режимів експлуатації. Запропоновано концепцію потенціалу енергозбереження як інтегрального показника ефективності судових енергетичних систем, що базується на аналізі енергетичного балансу судна. Розроблено методичний підхід до визначення відносного потенціалу енергозбереження з урахуванням його ієрархічної структури, яка включає теоретичний, технічно досяжний та економічно доцільний рівні. Запропоновано узагальнені критерій енергоефективності у вигляді відносного потенціалу енергозбереження. Отримані результати дозволяють ідентифікувати внутрішні енергетичні втрати, здійснювати порівняльний аналіз енергоефективності суден та обґрунтовувати управлінські рішення щодо підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів, впровадження енергозберігаючих технологій та забезпечення відповідності міжнародним вимогам у сфері декарбонізації морського транспорту.

Ключові слова: енергоефективність суден, потенціал енергозбереження, судові енергетичні системи, енергетичний баланс судна, паливна ефективність, енергетичні втрати, експлуатаційні режими суден, морський транспорт, екологічна ефективність, декарбонізація судноплавства.

Постановка проблеми. У сучасних умовах розвитку морського транспорту питання підвищення енергоефективності суден торговельного флоту набуває особливої актуальності, що обумовлено зростанням вартості паливно-енергетичних ресурсів, посиленням міжнародних екологічних вимог та необхідністю забезпечення конкурентоспроможності судноплавних компаній. Впровадження регуляторних механізмів, таких як індекси EEDI, EEOI та показник інтенсивності викидів вуглецю (СІІ), сприяє підвищенню контролю за енергоспоживанням, проте не забезпечує повною мірою можливості комплексного аналізу ефективності функціонування судових енергетичних систем.

Існуючі підходи до оцінювання енергоефективності суден, як правило, базуються на узагальнених або проєктних показниках, що відображають середні характеристики енергоспоживання та не враховують вплив змінних експлуатаційних умов, режимів роботи енергетичних установок та внутрішньої структури енергетичних втрат. Це призводить до обмеженості їх використання для прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо оптимізації енергоспоживання та модернізації судових систем.

Особливої складності набуває задача ідентифікації та кількісної оцінки прихованих резервів енергозбереження, що формуються внаслідок недосконалості процесів перетворення, розподілу та використання енергії на борту судна. Відсутність єдиного узагальненого критерію, який би дозволяв інтегрувати технічні, експлуатаційні та економічні аспекти функціонування судових енергетичних систем, ускладнює процес порівняння ефективності різних суден, а також обґрунтування доцільності впровадження енергозберігаючих заходів.

Крім того, сучасні тенденції цифровізації морського транспорту, зокрема впровадження інтелектуальних систем управління енергоспоживанням та цифрових двійників суден, потребують наявності формалізованих та універсальних показників, придатних для використання в автоматизованих системах аналізу та підтримки прийняття рішень.

Таким чином, існує науково-прикладна проблема розроблення методичних основ оцінювання енергоефективності суден торговельного флоту, які б забезпечували можливість кількісного визначення потенціалу енергозбереження з урахуванням технічних характеристик судна, умов його експлуатації та економічної доцільності впровадження відповідних заходів. Розв'язання цієї проблеми є необхідною передумовою підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів, зниження рівня шкідливих викидів та забезпечення сталого розвитку морського транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема підвищення енергоефективності в морському транспорті [1] останнім часом привертає все більшу увагу вчених і практиків. Дослідження зосереджуються на вдосконаленні процесів споживання, перетворення та передачі енергії на суднах з метою зменшення витрати палива [2], мінімізації шкідливих викидів [3] та забезпечення відповідності нормативним вимогам ІМО [4].

У [5] автори представили концепцію та імітаційне моделювання системи управління енергоефективністю судна на основі аналізу експлуатаційних даних. Такий підхід дозволяє адаптувати енергоспоживання до динамічних умов рейсу. У свою чергу, у [6] автор оцінив енергоефективність пасажирського судна, вказавши на можливість підвищення експлуатаційних показників навіть у суден традиційної конструкції.

У [7] представлено розширений індекс викидів (EEI) для риболовних суден, який враховує не лише CO_2 , а й SO_x та NO_x , що забезпечує більш комплексну екологічну оцінку систем енергоспоживання. У [8] досліджується методологія оцінки викидів парникових газів з використанням індексів енергоефективності проєктування (EEDI), енергоефективності експлуатації (EEOI) та енергоефективності навігації (EENI), а також даних моніторингу у часових рядах.

Автори [9, 10] визначили перешкоди для впровадження заходів з енергоефективності у судноплаванні, включаючи інформаційну асиметрію, розподіл відповідальності між учасниками ринку та економічні бар'єри для інвестицій у нові технології. У [11] вчені досліджували співвідношення витрат і вигод різних технологій очищення баластних вод, що тісно пов'язане з енергоефективністю та споживанням електроенергії на борту.

Дослідники приділяють особливу увагу інноваційним технологіям, таким як системи на повітряній подушці [12], органічні цикли Ренкіна [13], використання фотоелектричних панелей та мініатюризація головних електричних щитів [14]. У роботі [15] автори систематизували підходи до скорочення викидів та підвищення енергоефективності, зокрема методи оптимізації швидкості та планування маршруту.

З точки зору методів математичного аналізу в роботі [16] запропоновано використання багатовимірної регресії та штучних нейронних мереж для оцінки ефективності енергоспоживання на основі даних про рейси.

Робота вчених [17] демонструє можливості використання планів управління енергоефективністю (SEEMP) в управлінні операційною ефективністю. У [18] поглиблено аналіз контейнеровозів, зосередивши увагу на взаємозв'язку між характеристиками двигуна, енергоспоживанням та параметрами навантаження. Попередні дослідження продемонстрували, що детальне моделювання потужності судна та енергетичних потоків на рівні підсистем забезпечує більш реалістичну основу для оцінки ефективності, ніж узагальнені показники рейсу [18, 19].

Впровадження Міжнародною морською організацією показника вуглецевої інтенсивності (CII) з обов'язковим класифікаційним рейтингом суден від А до Е ще раз підкреслило обмеження абсолютних та конструктивних показників ефективності [20]. Оскільки рейтинг CII дуже чутливий до умов експлуатації та щорічних показників ефективності, зростає потреба у відносних, нормалізованих показниках, здатних кількісно оцінити приховані резерви енергозбереження та сприяти прийняттю адаптивних рішень з управління енергоспоживанням протягом усього життєвого циклу судна.

Метою дослідження є удосконалення підходів до оцінювання енергоефективності суден шляхом формування узагальненого критерію, заснованого на потенціалі енергозбереження, який забезпечує комплексне врахування технічних, експлуатаційних та економічних факторів функціонування суднових енергетичних систем.

Основні результати дослідження. У результаті проведеного дослідження розроблено методичні основи оцінювання енергоефективності суден торговельного флоту, які базуються на концепції потенціалу енергозбереження як інтегрального показника ефективності функціонування суднових енергетичних систем.

Формування концепції потенціалу енергозбереження – запропоновано розглядати потенціал енергозбереження судна як сукупність нереалізованих резервів зниження енергетичних втрат, що виникають у процесах споживання, перетворення та передавання енергії на борту. На відміну від традиційних підходів, що базуються на питомих показниках витрати палива або викидів, запропонована концепція дозволяє оцінювати не лише фактичний рівень енергоефективності, але й можливості його підвищення. Показано, що використання потенціалу енергозбереження як базового критерію дає змогу врахувати внутрішню структуру енергетичних втрат та їх зв'язок із технічним станом судна, режимами експлуатації та організацією управління енергоспоживанням.

Класифікація потенціалу енергозбереження судна - удосконалено підхід до класифікації потенціалу енергозбереження за такими основними ознаками:

- за участю в енергетичних процесах (головна енергетична установка, допоміжні механізми, системи життєзабезпечення);
- за видом енергетичних ресурсів (паливо, тепла енергія, електроенергія, відновлювані джерела);
- за методом оцінювання (фактичний та розрахунковий потенціал);
- за рівнем управління (машинне відділення, навігаційний місток, берегові служби);
- за ступенем реалізації (реалізований, доступний без значних інвестицій, стратегічний резерв).

Запропонована класифікація забезпечує системний підхід до аналізу джерел енергетичних втрат і дозволяє визначати пріоритетні напрями підвищення енергоефективності.

Розроблення методичного підходу до оцінювання енергоефективності - сформовано методичний підхід, який базується на аналізі енергетичного балансу судна та передбачає:

- визначення загального обсягу споживаної енергії;
- ідентифікацію джерел енергетичних втрат;
- оцінювання структури енергоспоживання за підсистемами;
- визначення потенційних резервів зниження втрат.

Показано, що енергетичний баланс є базою для кількісної оцінки ефективності використання енергетичних ресурсів та формування інтегральних показників енергоефективності.

Формування узагальненого критерію енергоефективності – запропоновано узагальнений критерій оцінювання енергоефективності судна у вигляді відносного потенціалу енергозбереження, який визначається як частка енергії, що може бути збережена в загальному обсязі енергоспоживання.

Автор статті пропонує визначати відносний теоретичний потенціал енергозбереження за допомогою рівняння (1):

$$P_{RES}^{theor} = \frac{E_{pot}^{theor}}{E_{total}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

де $E_{pot}^{theor} = E_{total} \cdot (1 - \eta_e)$ - теоретично можлива кількість енергії, яку можна заощадити на судні завдяки впровадженню енергозберігаючих заходів (кВт·год або тонни паливного еквіваленту);

η_e - паливна економічність двигуна, що визначається як функція $f(\text{Engine power})$, приклад цієї функції наведено на рис. 1;

$E_{total} = F_c \cdot F_{lcv}$ - загальне споживання енергії судном протягом відповідного періоду (рік, рейс тощо), включаючи всі види палива та електроенергію (кВт·год або тонни паливного еквіваленту);

F_c - витрата палива судном за відповідний період (рік, рейс тощо), кг;

F_{lcv} - найнижча теплотворна здатність, кДж/кг.

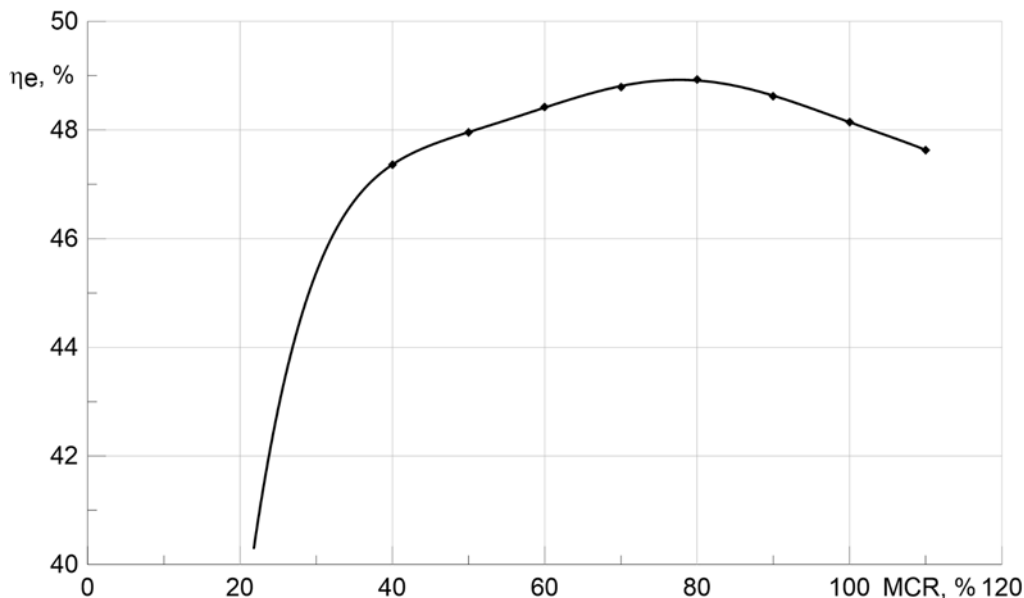


Рисунок 1 – Залежність паливної економічності двигуна MAN 6S46MC-C7 від ступеня його навантаження (% MCR).

Крива побудована автором на основі оцифрованих даних виробника щодо експлуатаційних характеристик та опублікованої технічної документації і відображає типову характеристику ефективності, а не виміряні експлуатаційні дані для конкретної установки двигуна.

З точки зору енергетичного балансу, термін $1 - \eta_e$ представляє сукупну частку енергії, яка не перетворюється на корисну механічну роботу і розсіюється через різні механізми втрат, включаючи тепло вихлопних газів, втрати системи охолодження, тертя та неефективність перетворення. На теоретичному рівні всі такі втрати розглядаються як єдиний верхній резерв для потенційної економії енергії. Це визначення не означає, що всі втрати є практично відновлюваними, а також не прив'язує відновлюваність до конкретних підсистем або форм енергії.

На рисунку 1 показано паливну ефективність головного двигуна MAN 6S46MC-C7 у залежності від рівня навантаження (% MCR). На графіку показано зміну питомої ефективності (ефективної корисної дії) двигуна в діапазоні від 20% до 110% номінальної потужності (Maximum Continuous Rating, MCR). Крива має чітко виражений максимум у діапазоні 80% MCR, де досягається найвищий рівень паливної ефективності - близько 49%.

Коли навантаження зменшується або збільшується, ККД знижується через збільшення відносних теплових втрат та неефективність процесів згоряння. Особливо помітне зниження ККД спостерігається, коли двигун працює при низьких навантаженнях (менше 40% MCR), де ККД може знижуватися до 42 % і нижче. Ця характеристика має вирішальне значення для обґрунтування режимів експлуатації судна та розрахунку потенціалу енергозбереження, оскільки робота в діапазоні 70–85 % від максимальної номінальної потужності (MCR) забезпечує оптимальний баланс між продуктивністю та витратою палива.

1. Ієрархія потенціалу енергозбереження

Розроблено ієрархічну структуру потенціалу енергозбереження, яка включає:

- теоретичний потенціал - максимально можливий рівень зниження енергетичних втрат;
- технічний потенціал - частка теоретичного потенціалу, що може бути реалізована з урахуванням сучасного технічного рівня;
- економічно доцільний потенціал - частка технічного потенціалу, реалізація якої є економічно обґрунтованою.

Такий підхід дозволяє перейти від ідеалізованих оцінок до практично реалізованих рішень та забезпечує обґрунтування інвестицій у підвищення енергоефективності.

2. Узагальнений алгоритм оцінювання енергоефективності

На основі проведених досліджень сформовано узагальнений алгоритм оцінювання енергоефективності судна, який включає такі етапи:

- збір технічних та експлуатаційних даних;
- побудова енергетичного балансу судна;
- визначення теоретичного потенціалу енергозбереження;
- урахування технічних обмежень;
- оцінювання економічної доцільності заходів;
- формування рекомендацій щодо підвищення енергоефективності.

Алгоритм може бути використаний як основа для створення автоматизованих систем моніторингу та підтримки прийняття рішень.

3. Демонстрація застосування методики – для підтвердження працездатності запропонованого підходу виконано узагальнену оцінку потенціалу енергозбереження на прикладі судової енергетичної системи. Показано, що найбільша частка енергетичних втрат пов'язана з процесами перетворення енергії в головних і допоміжних енергетичних установках, що свідчить про значні резерви підвищення енергоефективності за рахунок оптимізації режимів роботи, впровадження систем утилізації теплоти та вдосконалення управління енергоспоживанням.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що існуючі підходи до оцінювання енергоефективності суден торговельного флоту, засновані на використанні показників EEDI, EEOI, СІІ та інших індикаторів, не забезпечують комплексного урахування внутрішньої структури енергетичних втрат і не дозволяють кількісно оцінювати приховані резерви енергозбереження в судових енергетичних системах. У зв'язку з цим обґрунтовано доцільність використання потенціалу енергозбереження як інтегрального критерію оцінювання енергоефективності, що враховує технічні характеристики енергетичних установок, експлуатаційні режими їх роботи та організаційні аспекти управління енергоспоживанням.

Розроблено методичний підхід до оцінювання енергоефективності суден, який базується на аналізі енергетичного балансу та дозволяє ідентифікувати джерела енергетичних втрат, визначати структуру енергоспоживання і кількісно оцінювати потенційні резерви їх зниження. Запропоновано узагальнений критерій у вигляді відносного потенціалу енергозбереження, який характеризує частку енергії, що може бути збережена в загальному обсязі енергоспоживання, та забезпечує можливість порівняльного аналізу енергоефективності суден незалежно від їх типу і умов експлуатації.

Сформована ієрархічна структура потенціалу енергозбереження, що включає теоретичний, технічно досяжний та економічно доцільний рівні, забезпечує перехід від оцінки максимально можливих резервів до їх практичної реалізації з урахуванням технічних і економічних обмежень. Розроблений узагальнений алгоритм оцінювання може бути використаний як інструмент підтримки прийняття рішень щодо підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів, модернізації судових енергетичних систем та впровадження енергозберігаючих технологій.

Отримані результати підтверджують наявність значного потенціалу підвищення енергоефективності суден за рахунок оптимізації режимів роботи енергетичних установок, впровадження систем утилізації скидної теплоти та вдосконалення систем управління

енергоспоживанням. Запропонований підхід формує науково-методичну основу для розвитку сучасних інтелектуальних систем управління енергоефективністю суден, у тому числі в рамках цифрової трансформації морського транспорту, та сприяє забезпеченню відповідності міжнародним вимогам у сфері декарбонізації судноплавства.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Matieiko, O., Razinkin, R., Stoliaryk, T., & Volkov, O. (2024). Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(8), 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>
2. Sagin, S., Haichenia, O., Karianskyi, S., Kuropyatnyk, O., Razinkin, R., Sagin, A., & Volkov, O. (2025). Improving Green Ship-ping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(3), 589. <https://doi.org/10.3390/jmse13030589>
3. Sagin, S. V., Sagin, S. S., & Madey, V. (2023). Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation pas-sage of ships of maritime transport. *Technology Audit and Production Reserves*, 4(3(72)), 33–42. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>
4. Zheng, Z., & Zhou, X. (2019). Design and Simulation of Ship Energy Efficiency Management System Based on Data Analysis. *Journal of Coastal Research*, 94(sp1), 552. <https://doi.org/10.2112/SI94-109.1>
5. Tokuslu, A. (2020). Energy efficiency of a passenger ship in Turkey. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, XXIII(1), 15–21. <https://doi.org/10.21279/1454-864X-20-11-002>
6. Koričan, M., Vladimir, N., Haramina, T., Alujević, N., & Vučković, K. (2023). EXTENDED EMISSION INDEX FOR FISHING VESSELS: ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS OF A PURSE SEINER WITH AN ALTERNATIVE POWER SYSTEM. 225–232. <https://doi.org/10.2495/ESUS230191>
7. Ehlers, S., Asbjornslett, B. E., Rodseth, O. J., & Berg, T. E. (Eds.). (2014). A study on estimation methodology of GHG emission from vessels by using energy efficiency index and time series monitoring data. In *Maritime-Port Technology and Development* (0 ed., pp. 43–50). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17517-6>
8. Rehmatulla, N., & Smith, T. (2015). Barriers to energy efficient and low carbon shipping. *Ocean Engineering*, 110, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.09.030>
9. Rehmatulla, N., & Smith, T. (2015). Barriers to energy efficiency in shipping: A triangulated approach to investigate the principal agent problem. *Energy Policy*, 84, 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.04.019>
10. Vorkapić, A., Radonja, R., & Zec, D. (2018). Cost Efficiency of Ballast Water Treatment Systems Based on Ultraviolet Irradiation and Electrochlorination. *Promet - Traffic&Transportation*, 30(3), 343–348. <https://doi.org/10.7307/ptt.v30i3.2564>
11. Kim, Y.-R., & Steen, S. (2023). Potential energy savings of air lubrication technology on merchant ships. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 15, 100530. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2023.100530>
12. Yang, M.-H., & Yeh, R.-H. (2015). Thermodynamic and economic performances optimization of an organic Rankine cycle sys-tem utilizing exhaust gas of a large marine diesel engine. *Applied Energy*, 149, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.083>
13. Krčum, M., Zubčić, M., Kaštelan, N., & Gudelj, A. (2021). Reducing the Dimensions of the Ship's Main Switchboard—A Contri-bution to Energy Efficiency. *Energies*, 14(22), 7567. <https://doi.org/10.3390/en14227567>
14. Jimenez, V. J., Kim, H., & Munim, Z. H. (2022). A review of ship energy efficiency research and directions towards emission reduction in the maritime industry. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132888. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132888>
15. Öztürk, O. B., & Başar, E. (2022). Multiple linear regression analysis and artificial neural networks based decision support system for energy efficiency in shipping. *Ocean Engineering*, 243, 110209. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110209>
16. Im, N., Choe, B., & Park, C.-H. (2019). Developing and Applying a Ship Operation Energy Efficiency Evaluation Index Using SEEMP: A Case Study of South Korea. *Journal of Marine Science and Application*, 18(2), 185–194. <https://doi.org/10.1007/s11804-019-00090-w>
17. Aijjou, A., Bahatti, L., & Raihani, A. (2020). Analy sis of container ship energy systems. *International Journal of Energy Production and Management*, 5(2), 142–156. <https://doi.org/10.2495/EQ-V5-N2-142-156>
18. Golovan, A., Gritsuk, I., Popeliuk, V., Sherstyuk, O., Honcharuk, I., Symonenko, R., Saravas, V., Volodarets, M., Ahieiev, M., Pohorletskyi, D., & Khudiakov, I. (2020). Features of mathematical modeling in the problems of determining the power of a tur-bocharged engine according to the characteristics of the turbocharger. *SAE International Journal of Engines*, 13(1). Scopus. <https://doi.org/10.4271/03-13-01-0001>

19. Golovan, A., Gritsuk, I., Kurtsev, M., Ischuka, O., & Vrublevskiy, R. (2020). Aspects of Remote Monitoring of the Transport Vessel Under Operating Conditions. In Lecture. Notes. Intell. Transp. Infrastruct.: Vol. Part F1382 (pp. 295–301). Springer Nature; Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_37

20. Holovan, A., Gritsuk, I., Verbovskiy, V., Kalchenko, V., Grytsuk, Y., Verbovskiy, O., Dotsenko, S., Lysykh, A., Symonenko, R., & Subochev, O. (2025). Algorithmic support and efficiency analysis of comprehensive prescriptive maintenance for cargo ships using predictive monitoring. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3 (135)), 13–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.331875>

REFERENCES

1. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Matieiko, O., Razinkin, R., Stoliaryk, T., & Volkov, O. (2024). Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(8), 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>

2. Sagin, S., Haichenia, O., Karianskyi, S., Kuropyatnyk, O., Razinkin, R., Sagin, A., & Volkov, O. (2025). Improving Green Ship-ping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(3), 589. <https://doi.org/10.3390/jmse13030589>

3. Sagin, S. V., Sagin, S. S., & Madey, V. (2023). Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation pas-sage of ships of maritime transport. *Technology Audit and Production Reserves*, 4(3(72)), 33–42. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>

4. Zheng, Z., & Zhou, X. (2019). Design and Simulation of Ship Energy Efficiency Management System Based on Data Analysis. *Journal of Coastal Research*, 94(sp1), 552. <https://doi.org/10.2112/SI94-109.1>

5. Tokuslu, A. (2020). Energy efficiency of a passenger ship in Turkey. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, XXIII(1), 15–21. <https://doi.org/10.21279/1454-864X-20-11-002>

6. Koričan, M., Vladimir, N., Haramina, T., Alujević, N., & Vučković, K. (2023). EXTENDED EMISSION INDEX FOR FISHING VESSELS: ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS OF A PURSE SEINER WITH AN ALTERNATIVE POWER SYSTEM. 225–232. <https://doi.org/10.2495/ESUS230191>

7. Ehlers, S., Asbjornslett, B. E., Rodseth, O. J., & Berg, T. E. (Eds.). (2014). A study on estimation methodology of GHG emission from vessels by using energy efficiency index and time series monitoring data. In *Maritime-Port Technology and Development* (0 ed., pp. 43–50). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17517-6>

8. Rehmatulla, N., & Smith, T. (2015). Barriers to energy efficient and low carbon shipping. *Ocean Engineering*, 110, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.09.030>

9. Rehmatulla, N., & Smith, T. (2015). Barriers to energy efficiency in shipping: A triangulated approach to investigate the principal agent problem. *Energy Policy*, 84, 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.04.019>

10. Vorkapić, A., Radonja, R., & Zec, D. (2018). Cost Efficiency of Ballast Water Treatment Systems Based on Ultraviolet Irradiation and Electrochlorination. *Promet - Traffic&Transportation*, 30(3), 343–348. <https://doi.org/10.7307/ptt.v30i3.2564>

11. Kim, Y.-R., & Steen, S. (2023). Potential energy savings of air lubrication technology on merchant ships. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 15, 100530. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2023.100530>

12. Yang, M.-H., & Yeh, R.-H. (2015). Thermodynamic and economic performances optimization of an organic Rankine cycle sys-tem utilizing exhaust gas of a large marine diesel engine. *Applied Energy*, 149, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.083>

13. Krčum, M., Zubčić, M., Kaštelan, N., & Gudelj, A. (2021). Reducing the Dimensions of the Ship's Main Switchboard—A Contri-bution to Energy Efficiency. *Energies*, 14(22), 7567. <https://doi.org/10.3390/en14227567>

14. Jimenez, V. J., Kim, H., & Munim, Z. H. (2022). A review of ship energy efficiency research and directions towards emission reduction in the maritime industry. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132888. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132888>

15. Öztürk, O. B., & Başar, E. (2022). Multiple linear regression analysis and artificial neural networks based decision support system for energy efficiency in shipping. *Ocean Engineering*, 243, 110209. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110209>

16. Im, N., Choe, B., & Park, C.-H. (2019). Developing and Applying a Ship Operation Energy Efficiency Evaluation Index Using SEEMP: A Case Study of South Korea. *Journal of Marine Science and Application*, 18(2), 185–194. <https://doi.org/10.1007/s11804-019-00090-w>

17. Aijjou, A., Bahatti, L., & Raihani, A. (2020). Analy sis of container ship energy systems. *International Journal of Energy Production and Management*, 5(2), 142–156. <https://doi.org/10.2495/EQ-V5-N2-142-156>

18. Golovan, A., Gritsuk, I., Popeliuk, V., Sherstyuk, O., Honcharuk, I., Symonenko, R., Saravas, V., Volodarets, M., Ahieiev, M., Pohorltskyi, D., & Khudiakov, I. (2020). Features of mathematical modeling in the problems of determining the power of a turbocharged engine according to the characteristics of the turbocharger. *SAE International Journal of Engines*, 13(1). Scopus. <https://doi.org/10.4271/03-13-01-0001>

19. Golovan, A., Gritsuk, I., Kurtsev, M., Ischuka, O., & Vrublevskiy, R. (2020). Aspects of Remote Monitoring of the Transport Vessel Under Operating Conditions. In *Lecture Notes. Intell. Transp. Infrastruct.: Vol. Part F1382* (pp. 295–301). Springer Nature; Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_37

20. Holovan, A., Gritsuk, I., Verbovskiy, V., Kalchenko, V., Grytsuk, Y., Verbovskiy, O., Dotsenko, S., Lysykh, A., Symonenko, R., & Subochev, O. (2025). Algorithmic support and efficiency analysis of comprehensive prescriptive maintenance for cargo ships using predictive monitoring. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3 (135)), 13–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.331875>

Honcharuk I.P.

IMPROVING APPROACHES TO ASSESSING THE ENERGY EFFICIENCY OF SHIPS BASED ON ENERGY-SAVING POTENTIAL

Given the current trend toward stricter requirements for energy efficiency and environmental safety in maritime transport, there is a pressing need to improve methods for assessing the efficiency of energy resource use in merchant ships. Existing approaches, in particular the EEDI, EEOI, and CII indicators, are largely focused on generalized or design characteristics and do not provide the ability to quantitatively identify hidden energy-saving potential in ship power systems. The aim of the study is to develop methodological foundations for assessing ship energy efficiency based on determining energy-saving potential, taking into account technical, operational, and economic factors. The paper analyzes modern scientific approaches to assessing ship energy efficiency and identifies their limitations under variable operating conditions. A concept of energy-saving potential is proposed as an integral indicator of the efficiency of ship power systems, based on an analysis of the ship's energy balance. A methodological approach has been developed for determining the relative energy-saving potential, taking into account its hierarchical structure, which includes theoretical, technically achievable, and economically feasible levels. A generalized criterion for energy efficiency in the form of relative energy-saving potential is proposed. The results obtained allow for the identification of internal energy losses, the conduct of a comparative analysis of ship energy efficiency, and the justification of management decisions regarding the improvement of energy resource utilization, the implementation of energy-saving technologies, and ensuring compliance with international requirements in the field of maritime transport decarbonization.

Keywords: ship energy efficiency, energy-saving potential, ship power systems, ship energy balance, fuel efficiency, energy losses, ship operating modes, maritime transport, environmental performance, decarbonization of shipping.

Стаття прийнята 13.02.2026