

Автомобільний, річковий, морський та авіаційний транспорт

УДК 656.61:330.322:504.05

doi: 10.26906/SUNZ.2025.3.5-9

М. П. Булгаков, О. В. Логінов, О. М. Мельник

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОЦІНКА СТРАТЕГІЙ МОДЕРНІЗАЦІЇ СУДЕН ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ CO₂ НА БАЗІ МЕТОДУ TOPSIS

Анотація. Актуальність. У контексті реалізації стратегії декарбонізації морського транспорту, актуальним постає завдання вибору оптимальної стратегії модернізації судна, яка забезпечить зменшення викидів CO₂ при збереженні економічної доцільності та технічної здійсненності впровадження. З огляду на різноманіття альтернатив, що відрізняються за вартістю, строком окупності, екологічним ефектом та ризиком, виникає потреба у комплексному методі прийняття рішень. **Об'єкт дослідження:** багатокритеріальна модель оцінювання стратегій модернізації суден. **Мета:** застосування методу TOPSIS для визначення найефективнішої альтернативи технічної модернізації судна з урахуванням економічних, екологічних та інженерних факторів. **Результати.** У роботі проаналізовано п'ять стратегій модернізації суден. За п'ятьма критеріями розраховано інтегральний показник ефективності. Результати аналізу демонструють, що стратегія slow steaming має найбільш збалансований профіль. **Висновки.** Модель TOPSIS виявилась ефективною для ранжування альтернатив модернізації з урахуванням множинних критеріїв і може бути використана для обґрунтованого прийняття рішень у сфері управління проектами сталого розвитку морського транспорту.

Ключові слова: морський транспорт, модернізація судна; викиди CO₂; стратегія slow steaming; багатокритеріальна оцінка; енергоефективність; захист середовища, сталий розвиток; екологічна безпека; морський транспорт; проектне управління.

Вступ

Постановка проблеми. Сучасні судовласники стикаються з необхідністю вибору між декількома сценаріями модернізації, кожен з яких має власні переваги й недоліки з точки зору вартості, строку окупності, ефективності скорочення викидів та технічної складності.

Ускладнення прийняття рішень зумовлене як регуляторною невизначеністю, так і обмеженим ресурсом підприємств.

Відсутність прозорої системи порівняння альтернатив здебільшого уповільнює екологічну трансформацію морського транспорту, що зумовлює необхідність розроблення кількісних моделей, які дозволяють об'єктивно ранжувати стратегії модернізації за сукупністю ключових критеріїв.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях спостерігається активне впровадження багатокритеріальних методів прийняття рішень, таких як TOPSIS, ANFIS та їх гібридних комбінацій з штучними нейронними мережами та алгоритмами оптимізації, для вирішення задач енергетичної ефективності, екологічної безпеки та експлуатаційного ризику транспортних систем [1–7].

Значна увага приділяється використанню таких підходів для оптимізації сумішей палива, зменшення викидів та підвищення коефіцієнтів ефективності двигунів внутрішнього згоряння.

Окремі дослідження [8,–11] фокусуються на стратегічному плануванні переходу до циркулярної економіки та декарбонізації енергосистем, з урахуванням міжнародної політики регулювання викидів.

У галузі морських перевезень виокремлюються огляди з акцентом на методах оцінки ризику у морському транспорті [12], побудову стійких енергетичних моделей для «розумних міст» [10], а також цифрову трансформацію логістичних ланцюгів постачання [13–15].

У інших джерелах автори [16–20] презентують низку прикладних досліджень, що стосуються інновацій у використанні судового палива (зокрема водневому), а також оцінки впливу енергоефективності на загальну експлуатаційну безпеку.

У роботах [17, 18] розглядаються концепції технологічних інновацій на морському транспорті, а роботи [19, 20] наголошують на важливості ризик-орієнтованого підходу до регулювання галузі з урахуванням глобальних трендів.

Таким чином, вивчення наявної літератури підтверджує актуальність розвитку моделей, які об'єднують екологічні, енергетичні та експлуатаційні аспекти безпеки морського транспорту.

Мета та завдання дослідження. Розробити і застосувати багатокритеріальну модель на базі методу TOPSIS для вибору оптимальної стратегії модернізації судна з метою зниження викидів CO₂.

Завдання дослідження складаються з наступних завдань:

- сформулювати множину альтернатив технічного оновлення судна;
- визначити систему критеріїв оцінювання, враховуючи техніко-економічні та екологічні показники;
- здійснити нормалізацію, вагове оцінювання та обчислення ранжування за методом TOPSIS;

– провести інтерпретацію результатів та сформулювати практичні рекомендації.

Основний матеріал

Зниження викидів парникових газів у морському транспорті є ключовим завданням сучасної екологічної політики в рамках реалізації цілей сталого розвитку та зобов'язань за Паризькою угодою. Згідно з оцінками міжнародних організацій, морський флот відповідає за понад 2% глобальних викидів CO₂, що створює значний вплив на кліматичну систему. Одним із стратегічних напрямів декарбонізації є технічна модернізація суден із впровадженням інноваційних енергоефективних рішень. Водночас різноманіття доступних технологій, їх витрати, ефективність та пов'язані ризики створюють складність для ухвалення обґрунтованих управлінських рішень, що зумовлює актуальність застосування багатокритеріальних методів оцінювання, які дозволяють комплексно порівняти альтернативи та визначити оптимальну стратегію щодо оновлення флоту.

Методологія дослідження. Для вирішення поставленої задачі у роботі використано багатокритеріальний метод оцінювання альтернатив TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution). Метод дозволяє порівняти декілька варіантів рішень за множиною як кількісних, так і якісних критеріїв, що мають різну спрямованість (мінімізація/максимізація), і ранжувати альтернативи за ступенем близькості до умовно найкращого (ідеального) та найгіршого (антиідеального) рішень. Логіка методу TOPSIS полягає в тому що він ґрунтується на наступній логіці що найкраще рішення це те, яке найближче до ідеального і надалі від анти ідеального тобто всі альтернативи порівнюються за евклідового відстанню до цих двох умовних крайніх точок. Основні етапи алгоритму TOPSIS складаються з наступних:

1. Формування матриці прийняття рішень. Матриця $X = [x_{ij}]$ містить альтернативи A_i (рядки) та критерії C_j (стовпці).

2. Нормалізація значень. Кожен елемент нормалізується за формулою:

$$r_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}, \quad (1)$$

3. Зважування нормалізованої матриці. Нормалізовані значення множаться на ваги критеріїв w_j :

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij}, \quad (2)$$

де сума ваг дорівнює одиниці.

4. Визначення ідеального A^+ та антиідеального A^- рішень. Для кожного критерію обирається найкраще і найгірше значення з урахуванням спрямованості оптимізації (макс або мін).

5. Обчислення відстаней до ідеалу і антиідеалу:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, \quad (3)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}.$$

6. Обчислення індексу близькості (рейтинг):

$$C_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-). \quad (4)$$

Значення $C_i \in [0;1]$, де чим ближче до 1, тим краща альтернатива.

Альтернативи та критерії оцінювання. У рамках моделі проаналізовано п'ять альтернативних сценаріїв модернізації судна, кожен з яких передбачає впровадження окремого технічного або операційного рішення з потенціалом скорочення викидів CO₂. Вибір альтернатив базується на актуальних технологічних тенденціях у галузі морського транспорту.

У табл. 1 наведено п'ять стратегій модернізації суден, які становлять альтернативи у моделі багатокритеріального оцінювання. Кожна альтернатива передбачає технічне рішення, спрямоване на підвищення енергоефективності та зменшення викидів CO₂, і характеризується певними витратами, ризиками та екологічною ефективністю.

Таблиця 1 – Альтернативи модернізації суден

Код	Назва альтернативи	Короткий опис
A ₁	Dual-fuel LNG engine	Переобладнання двигуна для роботи на LNG
A ₂	Shore power integration	Живлення судна електрикою в порту
A ₃	Slow steaming strategy	Обмеження крейсерської швидкості
A ₄	Air lubrication system	Подача повітря під корпус для зменшення тертя
A ₅	Hull coating optimization	Поліпшене антикорозійне покриття корпусу

Оцінювання ефективності кожної альтернативи здійснюється за п'ятьма критеріями, які охоплюють ключові економічні, екологічні та технічні параметри. Вибір критеріїв базується на сучасних вимогах до судноплавства в умовах енергетичного переходу. Зокрема, приділяється особлива увага потенціалу скорочення викидів та термінам окупності.

У табл. 2 подано систему критеріїв із зазначенням їхньої спрямованості оптимізації та ваги.

Сформована система критеріїв дозволяє здійснити комплексну багатофакторну оцінку кожної з технологічних альтернатив, забезпечуючи збалансований підхід до аналізу ефективності модернізації суден.

Формування матриці рішень і розрахунок рейтингу за методом TOPSIS. Після визначення альтернатив та системи критеріїв було сформовано матрицю прийняття рішень $X = [x_{ij}]$, де кожен елемент x_{ij} представляє значення критерію j для альтернативи i .

Таблиця 2 – Критерії оцінювання альтернатив модернізації

Код	Критерій	Спрямованість	Вага критерію
C ₁	CAPEX (млн USD)	Мінімізується	0.20
C ₂	OPEX saving per year (млн USD)	Максимізується	0.20
C ₃	Payback period (роки)	Мінімізується	0.15
C ₄	CO ₂ reduction (тонн/рік)	Максимізується	0.30
C ₅	Technical risk (оцінка експерта, 1-5)	Мінімізується	0.15

У табл. 3 наведено вихідні значення для п'яти обраних альтернатив модернізації суден.

Для коректного застосування методу TOPSIS, матриця нормалізується векторним методом (2).

Після цього нормалізована матриця зважується за допомогою вектору ваг w_j , отримуючи зважену матрицю $V = [v_{ij}]$ (2).

Далі визначаються ідеальний розв'язок A^+ та антиідеальний розв'язок A^- , які формуються шляхом

вибору максимальних або мінімальних значень відповідно до спрямованості критеріїв. Відстані кожної альтернативи до ідеального та антиідеального рішень обчислюються за формулами (3). На фінальному етапі розраховується індекс близькості до ідеального рішення (4).

Таким чином цей показник визначає ранг кожної альтернативи: чим ближче C_i до 1, тим ефективнішою є стратегія з точки зору комплексної оцінки.

Таблиця 3 – Матриця прийняття рішень

Альтернатива	C ₁ : CAPEX	C ₂ : OPEX saving	C ₃ : Payback	C ₄ : CO ₂ reduction	C ₅ : Risk
A ₁ : LNG engine	8.5	1.7	5.0	22000	2
A ₂ : Shore power	3.0	0.6	5.0	12000	3
A ₃ : Slow steaming	0.6	0.8	0.75	15000	4
A ₄ : Air lubrication	2.2	0.5	4.4	8000	2
A ₅ : Hull coating	0.9	0.3	3.0	5000	1

Інтерпретація результатів і ранжування альтернатив. На основі проведених обчислень було отримано індекси близькості C_i до ідеального рішення для кожної з п'яти альтернатив модернізації. Табл. 4 відображає результат ранжування згідно з методом TOPSIS, де вищий рейтинг означає кращу сукупну ефективність альтернативи з урахуванням усіх критеріїв.

Таблиця 4 – Рейтинг альтернатив модернізації за методом TOPSIS

Альтернатива	TOPSIS Score	Ранг
A ₃ : Slow steaming strategy	0.826	1
A ₁ : Dual-fuel LNG engine	0.662	2
A ₅ : Hull coating optimization	0.519	3
A ₂ : Shore power integration	0.459	4
A ₄ : Air lubrication system	0.312	5

Найвищий рейтинг отримала стратегія повільного ходу або на зменшених швидкостях (Slow steaming). Вона поєднує низькі інвестиційні витрати, прийнятний строк окупності та значний екологічний ефект при відносно помірному ризику впровадження. На другому місці у ранжуванні двопаливний двигун

(LNG), який забезпечує найвищий рівень скорочення викидів, проте має суттєво вищий CAPEX. Найменш ефективною виявилася стратегія «повітряної подушки», яка має низький екологічний ефект і незначну економію витрат. Для оцінки сильних і слабких сторін кожної з розглянутих альтернатив побудовано діаграму на рис. 1, яка дозволяє візуально зіставити показники за п'ятьма ключовими критеріями: капітальні витрати (CAPEX), щорічна економія (OPEX saving), строк окупності (Payback), скорочення викидів CO₂ та технічний ризик. Кожна вісь діаграми відображає нормалізоване значення відповідного критерію в діапазоні [0; 1], де більший радіус вказує на кращий результат.

Аналіз діаграми підтверджує, що стратегія Slow steaming демонструє збалансовані переваги за всіма критеріями: найменші витрати, швидкий період окупності, відносно високий екологічний ефект та прийнятний ризик. Стратегія «LNG engine», попри високі початкові витрати, має найбільший потенціал зниження викидів CO₂.

Втім «Hull coating optimization» забезпечує найнижчий технічний ризик та невисокі витрати, однак поступається в екологічній ефективності. Щодо стратегій «shore power» та «air lubrication» то вони демонструють менш збалансовані профілі при невисоких витратах мають або обмежену екологічну користь, або вищий ризик.

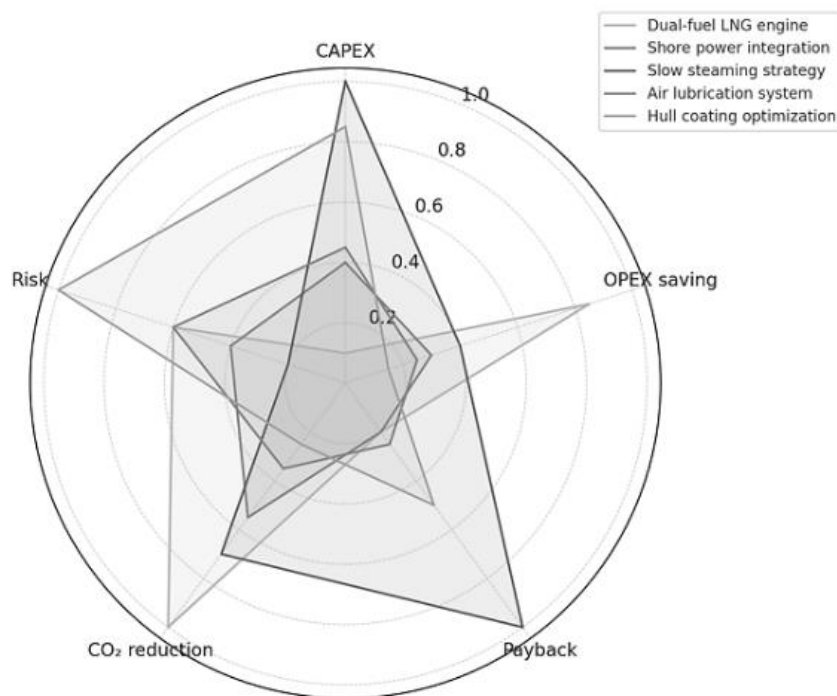


Рис. 1. Профілі альтернатив модернізації суден за ключовими критеріями

Таким чином, діаграма дозволяє наочно представити компромісні рішення між економічними, екологічними та технічними аспектами і може бути використано як інструмент для підтримки прийняття рішень.

Висновки

Результати багатокритеріального аналізу демонструють, що поєднання екологічної ефектив-

ності, економічної доцільності та низького технічного ризику дозволяє ідентифікувати повільний хід як найбільш збалансовану стратегію модернізації суден у сучасних умовах. Метод TOPSIS представляє собою ефективний інструмент для кількісного обґрунтування управлінських рішень у сфері морського транспорту, а результати дослідження можуть бути використані при формуванні інвестиційних програм, технічних аудитів судноплавних компаній.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tamilvanan, A., Mohanraj, T., Ashok, B., & Santhoshkumar, A. (2023). Enhancement of energy conversion and emission reduction of Calophyllum inophyllum biodiesel in diesel engine using reactivity controlled compression ignition strategy and TOPSIS optimization. *Energy*, 264, 126168. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126168>
2. Kirankumar, K., Kumar, G., Kamath, N., & Gangadharan, K. (2024). Experimental investigation and optimization of performance, emission, and vibro-acoustic parameters of SI engine fueled with n-propanol and gasoline blends using ANN-GA coupled with NSGA3-modified TOPSIS hybrid approach. *Energy*, 306, 132521. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132521>
3. Bhumula, K. B., & Kumar, G. N. (2024). Using CRITIC-TOPSIS and python to examine the effect of 1-Hepatnol on the performance and emission characteristics of CRDI CI engine with split injection. *Heliyon*, 10(11), e31484. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31484>
4. Das, S., Tamang, S. K., & Kalita, P. (2025). An integrated ANFIS-TOPSIS approach for enhanced performance and emissions characteristics in syngas-diesel powered dual-fuel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 139, 1116-1132. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.414>
5. Han, Y., Ji, W., Liu, L., Cao, L., Ping, W., & Fan, J. (2025). Impact of the National Economy and Air Pollutant Emissions on Chinese Energy Mix: Evidence from an SBMDEA-TOPSIS Model. *Energy*, 136098. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136098>
6. Bathala, R., G. H., Rajkumar, S., S. D. A., & Jeyaseelan, T. (2024). Experimental investigation, ANN modeling, and TOPSIS optimization of gasoline-alcohol blends for minimizing tailpipe emissions of a motorcycle. *Energy*, 293, 130698. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130698>
7. Negarestani, M. N., Hajikandi, H., Fatehi-Nobarian, B., & Majrouhi Sardroud, J. (2024). Introducing green structure based on the pattern of TOPSIS method by grey wolf algorithm. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering Sustainability*. <https://doi.org/10.1680/jensu.23.00096>
8. Iqbal, M., Fan, Y., Ahmad, N., & Ullah, I. (2025). Circular economy solutions for net-zero carbon in China's construction sector: A strategic evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 504, 145398. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145398>
9. Hu, M., Fan, B., Wang, H., Qu, B., & Zhu, S. (2016). Constructing the ecological sanitation: A review on technology and methods. *Journal of Cleaner Production*, 125, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.012>
10. Hoang, A. T., Pham, V. V., & Nguyen, X. P. (2021). Integrating renewable sources into energy system for smart city as a sagacious strategy towards clean and sustainable process. *Journal of Cleaner Production*, 305, 127161. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127161>

11. Shuai, J., Xiong, X., Huang, C., Zhao, Y., Chen, X., & Shuai, C. (2025). What is the impact of EU's carbon border adjustment mechanism on the economy and emissions reduction of its electric power trading partners? *Journal of Cleaner Production*, 145517. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145517>
12. Huang, X., Wen, Y., Zhang, F., Han, H., Huang, Y., & Sui, Z. (2023). A review on risk assessment methods for maritime transport. *Ocean Engineering*, 279, 114577. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114577>
13. Ali, Y., Saad, T. B., & Rehman, O. U. (2019). Integration of IoT technologies in construction supply chain networks; CPEC a case in point. *Sustainable Operations and Computers*, 1, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2020.12.003>
14. Mohammed, A., Naghshineh, B., Spiegler, V., & Carvalho, H. (2021). Conceptualising a supply and demand resilience methodology: A hybrid DEMATEL-TOPSIS-possibilistic multi-objective optimization approach. *Computers & Industrial Engineering*, 160, 107589. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107589>
15. Iqbal, M., Fan, Y., Ahmad, N., & Ullah, I. (2025). Circular economy solutions for net-zero carbon in China's construction sector: A strategic evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 504, 145398. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145398>
16. Мельник О. М., Волошин А. О., Онищенко О. А., Щербина О. В., Васалатій Н. В., Никитюк П. В. Організація забезпечення інформаційної безпеки морського судна. // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2022. № 201. С. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.201.2022.267758>
17. Melnyk O., Shcherbina O., Mykhailova I., Obnyavko T., Korobko T. Focused research on technological innovations in shipping industry: review and prospects. // *Transport Development*. 2023. № 1(16). С. 164–174. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.13>
18. Мельник О. М., Шумило О. М., Онищенко О. А., Михайлова Ю. В., Обнявко Т. С., Коробко Т. О. Концепція та перспективи використання водного палива на морському транспорті. // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2023. № 203. С. 96–105.
19. Мельник О. М. Оцінка впливу енергоефективності на безпеку експлуатації судна. // *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2023. № 2(39). С. 76–81. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-2.11>
20. Мельник О. М. Актуальні проблеми безпеки морського транспорту: тенденції, ризики та стратегії врегулювання. // *Водний транспорт*. 2023. № 1(37). С. 116–126. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.13>

Received (Надійшла) 17.04.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.07.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Булгаков Микола Петрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри судноводіння і морська безпека, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна;

Mykola Bulgakov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Navigation and Maritime Safety, Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine;

e-mail: npbulgakov2@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-7172-8678>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57312351600>.

Логінов Олег Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри судноводіння і морська безпека, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна;

Oleh Lohinov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Navigation and Maritime Safety, Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine;

e-mail: ologinov@ukr.net; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-4540-731X>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57212620234>.

Мельник Олексій Миколайович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри судноводіння і морська безпека, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна;

Oleksii Melnyk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Navigation and Maritime Safety, Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine;

e-mail: m.onmu@ukr.net; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-9228-8459>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216657937>.

Multi-criteria evaluation of ship modernization strategies for CO₂ emission reduction based on the topsis method

Mykola Bulgakov, Oleh Lohinov, Oleksii Melnyk

Abstract. Relevance. In the context of implementing a decarbonization strategy for maritime transport, the task of selecting the optimal ship modernization strategy becomes particularly relevant. Such a strategy must reduce CO₂ emissions while maintaining economic viability and technical feasibility. Given the diversity of available alternatives—differing in cost, payback period, environmental impact, and risk—a comprehensive decision-making method is required. **Object of research:** a multicriteria model for evaluating ship modernization strategies. **Purpose:** to apply the TOPSIS method to determine the most effective ship modernization alternative, taking into account economic, environmental, and engineering factors. **Results.** The study analyzes five ship modernization strategies. An integrated efficiency indicator was calculated using five evaluation criteria. The analysis results show that the slow steaming strategy presents the most balanced profile. **Conclusions.** The TOPSIS model proved effective for ranking modernization alternatives based on multiple criteria and can be used to support informed decision-making in sustainable maritime transport project management.

Keywords: maritime transport, ship modernization, CO₂ emissions, slow steaming strategy, multicriteria assessment, energy efficiency, environmental protection, sustainable development, environmental safety, maritime transport, project management.