

DOI: 10.31653/smf52.2026.116-124

дата першого надходження: 11.01.26
дата прийняття статті до друку після
рецензування: 21.02.26
дата публікації: 05.05.26

Фомін О.В.¹, Щербина Ю.В.², Мартиненко В.І.³, Мартиненко Д.І.⁴

¹ORCID: 0000-0003-2387-9946, ²ORCID: 0000-0002-9574-2757,

³ORCID: 0009-0005-9803-4421, ⁴ORCID: 0009-0006-3186-8082

Національний транспортний університет

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ «СУДНО – ВАГОН-ЦИСТЕРНА» З ОПТИМІЗАЦІЄЮ РЕЖИМІВ РОБОТИ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Постановка проблеми у загальному вигляді. Сучасний розвиток мультимодальних перевезень вимагає впровадження високоефективних технологічних рішень для інтеграції водного та залізничного транспорту. Створення систем «судно – вагон-цистерна» є стратегічно важливим напрямком для оптимізації логістики рідких вантажів та скраплених газів.

Енергетичні установки сучасних суден мають значний потенціал для оптимізації при взаємодії з береговою або залізничною інфраструктурою. Використання комплексного підходу дозволяє розглядати судно та залізничний склад як єдину техніко-технологічну систему. В умовах глобальної цифровізації інтеграція інтелектуальних систем управління режимами роботи суднових енергетичних установок стає критичною перевагою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження режимів роботи двигунів та допоміжних механізмів у зв'язці з гідравлічними параметрами вагонів-цистерн забезпечує синергетичний ефект. Теоретичне обґрунтування таких систем дозволяє зменшити експлуатаційні ризики та ймовірність аварійних ситуацій. Розробка нових алгоритмів проектування сприятиме підвищенню конкурентоспроможності вітчизняних логістичних вузлів. Науковий пошук у цьому напрямку відповідає світовим трендам розвитку «зеленого» судноплавства та смарт-інфраструктури.

У роботі [1] досліджено підходи до забезпечення надійності паливної апаратури дизелів, що є ключовим фактором стабільної роботи суднових енергетичних установок (СЕУ). Автори обґрунтовують

необхідність системного технічного обслуговування з урахуванням експлуатаційних режимів. У статті [2] розглянуто сучасні методи оптимізації енергоефективності суден з урахуванням складних навігаційних умов. Проведено систематичний аналіз факторів, що впливають на витрати енергії, включаючи погодні умови та маршрути. Отримані висновки можуть бути використані для узгодження режимів роботи суден із графіками перевезень вагонів-цистерн. У публікації [3] досліджено перспективи розвитку відновлюваної енергетики у суднопластві. Автори аналізують технологічні рішення, що сприяють зменшенню викидів і підвищенню екологічності транспортних систем. Отримані результати важливі для створення екологічно орієнтованих систем «судно – вагон-цистерна». У роботі [4] розглянуто застосування байпасу відпрацьованих газів для підвищення екологічних характеристик суднових дизелів. Дослідження спрямоване на оптимізацію робочих процесів двигунів без значних конструктивних змін. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні енергоефективних суден у складі мультимодальних перевезень. У статті [5] представлено інтегрований метод оптимізації енергоефективності гібридних суден із вітровою підтримкою. Автори розглядають поєднання різних джерел енергії для досягнення декарбонізації суднопластва. Результати дослідження можуть бути застосовані при створенні енергоефективних ланцюгів транспортування рідких вантажів. У роботі [6] запропоновано двоетапну оптимізацію маршруту, швидкості та енергоменеджменту гібридних суден. Метод враховує змінні морські умови та дозволяє мінімізувати енергоспоживання. Отримані результати мають значення для синхронізації морських і залізничних перевезень. У дослідженні [7] розглянуто оптимізацію енергоспоживання у системах керування рухом суден за складних морських умов. Автори застосовують методи адаптивного керування для підвищення ефективності пропульсивних систем. Результати можуть бути інтегровані у системи управління мультимодальними перевезеннями. Це дозволяє підвищити надійність і економічність транспортних процесів. У статті [8] досліджено оптимізацію енергоефективності та оцінку ризиків у мультимодальних екологічно орієнтованих перевезеннях. Автори пропонують підхід до інтеграції енергетичних та логістичних параметрів. Отримані результати є важливими для проектування систем «судно – вагон-цистерна». Вони дозволяють підвищити безпеку та ефективність транспортування. У роботі [9] проаналізовано інноваційні технології та нормативну базу

оптимізації енергоспоживання у морському транспорті. Автори розглядають сучасні вимоги до енергоефективності та екологічності. Результати можуть бути використані при створенні інтегрованих транспортних систем. У статті [10] проведено аналіз методів управління екологічною безпекою судноплавства. Автори досліджують підходи до зменшення негативного впливу суден на навколишнє середовище.

Проведений аналіз наукових публікацій засвідчив, що більшість існуючих робіт фокусуються або на судових установках, або на залізничній логістиці окремо. Питанням формування єдиного методологічного базису для системи «судно – вагон-цистерна» з точки зору енергетичної взаємодії приділено недостатньо уваги. Дослідники часто ігнорують динамічну зміну режимів роботи судових агрегатів під час циклічного навантаження цистерн, що створює прогалини в оптимізаційних моделях. Відсутність комплексних алгоритмів проектування, які б враховували взаємозалежність гідродинамічних процесів у цистернах та паливної ефективності судна, стримує розвиток галузі. Таким чином, існує об'єктивна потреба у створенні цілісної наукової концепції, що заповнить виявлений дефіцит знань у цій специфічній сфері.

Постановка завдання. Проблема полягає у відсутності єдиної методології проектування, що об'єднує параметри судна та вагонів-цистерн в спільну енергетичну модель. Традиційні підходи розглядають ці ланки як ізольовані об'єкти, що призводить до енергетичних втрат на стику інтермодальних переходів.

Існує значне розходження між потенційною потужністю судових енергетичних установок та фактичним споживанням енергії системами терміналу. Необхідність стабілізації режимів роботи дизель-генераторів та котлоагрегатів під час перевалки вантажу вимагає нових математичних рішень.

Висока вартість енергоносіїв робить критичним кожен відсоток перевитрати під час технологічних стоянок. Також проблемою є складність прогнозування навантаження на судову мережу при зміні в'язкості вантажу або температурних умов. Відсутність уніфікованих систем управління заважає досягненню максимального коефіцієнту корисної дії (ККД) енергетичного комплексу. Технічні обмеження існуючих насосних станцій часто не узгоджуються з характеристиками залізничних ємностей. Це створює затримки в графіках оборотів транспортних одиниць та збільшує собівартість перевезень.

Потребує вирішення питання синхронізації продуктивності судових систем з пропускною здатністю залізничного фронту. Екологічні норми стають жорсткішими, що змушує переглядати режими холостого ходу та перехідних процесів. Розв'язання цієї проблеми забезпечить створення наукового підґрунтя для проектування транспортних систем нового покоління.

Метою дослідження є розробка науково обґрунтованого комплексного підходу до проектування системи «судно – вагон-цистерна» на основі математичного моделювання. Основна увага приділяється оптимізації режимів роботи судових енергетичних установок для мінімізації енерговитрат та часу вантажних операцій. Досягнення мети забезпечить підвищення загальної ефективності транспортно-логістичного процесу при перевалці наливних вантажів.

Об'єктом дослідження є процеси енергетичної та технологічної взаємодії в інтегрованій системі «судно – вагон-цистерна».

Предметом дослідження є закономірності формування режимів роботи судових енергетичних установок та методи їх оптимізації при проектуванні таких систем. Досліджуються функціональні залежності, що визначають ефективність використання ресурсів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Проектування системи «судно – вагон-цистерна» є складним комплексним завданням, що включає узгодження технічних параметрів суден та вагонів-цистерн, оптимізацію логістичних процесів у портах перевантаження та, що особливо важливо, забезпечення ефективної роботи судових енергетичних установок в різних режимах експлуатації [11].

Система «судно – вагон-цистерна» являє собою складний технічний комплекс, який можна представити у вигляді взаємопов'язаних підсистем:

1) транспортний флот – судна різних типів (танкери, газовози), обладнані вантажними системами та власними енергетичними установками;

2) залізничний компонент – вагони-цистерни різної вантажопідйомності та спеціалізації, які використовуються для доставки вантажів від порту до споживачів;

3) перевантажувальний термінал – комплекс споруд та обладнання для передачі рідкого вантажу між судном та вагонами-цистернами;

4) система управління – включає засоби контролю, диспетчеризації та оптимізації всіх процесів.

Ключовою особливістю такої системи є нерівномірність режимів роботи її елементів. Якщо суднова енергетична установка в основному працює в сталому ходовому режимі, то під час вантажних операцій вона часто функціонує в режимі «холостого ходу» або забезпечує роботу вантажних насосів.

Аналіз показує, що на загальну ефективність системи «судно – вагон-цистерна» впливають наступні групи факторів: технічні: продуктивність перевантажувального обладнання, місткість вагонів-цистерн, вантажопідйомність суден, характеристики СЕУ; технологічні: схема перевантаження, режими роботи насосного обладнання, способи підігріву в'язких вантажів; організаційні: графіки подачі вагонів, режим роботи порту, черговість обслуговування суден; енергетичні: питомі витрати палива, ККД енергетичних установок, можливість утилізації вторинних енергоресурсів [12].

Особливу увагу слід приділити енергетичному фактору, оскільки він визначає як економічну (вартість транспортування), так і екологічну (обсяги викидів) складові.

Суднова енергетична установка в складі розглянутого комплексу функціонує в таких основних режимах:

1) ходовий режим – забезпечення руху судна з оптимальною швидкістю. Цей режим характеризується сталою потужністю та максимальним ККД головного двигуна;

2) маневровий режим – робота при підході до терміналу, швартуванні та відході. Характеризується частими змінами навантаження та роботою на перехідних режимах;

3) вантажний режим – робота допоміжних дизель-генераторів для забезпечення роботи вантажних насосів, підігрівачів та іншого технологічного обладнання;

4) стоянковий режим – мінімальне енергоспоживання для забезпечення життєдіяльності судна.

Аналіз сучасних досліджень в області оптимізації роботи енергетичних систем на морських об'єктах показує перспективність використання системного підходу до розподілу навантажень між окремими енергоблоками. Стосовно до судових енергетичних установок це означає необхідність оптимізації кількості та режимів роботи паралельно працюючих дизель-генераторів.

Оптимальний розподіл навантаження між агрегатами СЕУ повинен забезпечувати:

- мінімальну питому витрату палива при заданому сумарному навантаженні
- рівномірне вироблення моторесурсу двигунів
- резервування потужності для критичних споживачів
- мінімізацію викидів шкідливих речовин

Математично задача оптимізації може бути сформульована наступним чином:

$$\min \sum_{i=1}^n b_i(P_i) \cdot P_i;$$

де $b_i(P_i)$ – питома витрата палива i -го агрегату як функція його потужності P_i при обмеженнях:

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_{\text{зар}}, \quad P_{i,\text{min}} \leq P_i \leq P_{i,\text{max}}.$$

Особливістю систем «судно – вагон-цистерна» є те, що вантажні операції створюють специфічний режим споживання електроенергії на судні. Потужність вантажних насосів може досягати сотень кіловат, що вимагає роботи кількох допоміжних дизель-генераторів.

Дослідження показують, що традиційний підхід, коли всі необхідні насоси запускаються одночасно на максимальну продуктивність, є неефективним. Значно кращих результатів можна досягти, застосовуючи: каскадне регулювання – послідовне включення насосів у міру збільшення потреби в продуктивності; частотне регулювання – зміна швидкості обертання насосів за допомогою перетворювачів частоти; синхронізацію режимів – узгодження продуктивності судових насосів з пропускнуою здатністю залізничного терміналу [13].

Для комплексної оптимізації системи розроблено математичну модель, яка враховує взаємозв'язки між її елементами. Цільова функція включає складові:

$$1) \text{ економічну: } F_1 = C_{\text{паливо}} + C_{\text{аморт}} + C_{\text{обслуг}} + C_{\text{еколог}} \rightarrow \min;$$

$$2) \text{ енергетичну: } F_2 = \sum E_{\text{спож}} - \sum E_{\text{утил}} \rightarrow \min;$$

$$3) \text{ екологічну: } F_3 = \sum m_{\text{CO}_2} + \sum m_{\text{NO}_x} + \sum m_{\text{SO}_x} \rightarrow \min.$$

Загальна оптимізаційна задача є багатокритеріальною. Важливим аспектом комплексного підходу є оптимізація графіків подачі вагонів-цистерн під перевантаження. Дослідження в галузі оптимізації логістики морських операцій демонструють, що використання мето-

дів кластеризації та багатоетапного планування дозволяє суттєво знизити витрати ресурсів. Для системи «судно – вагон-цистерна» це означає: узгодження часу прибуття вагонів з періодами вантажних операцій судна; групування подач для зменшення кількості маневрових операцій; врахування обмежень по одночасному знаходженню вагонів на терміналі.

Результати моделювання показують, що оптимальне планування дозволяє скоротити час стоянки судна під вантажними операціями, що безпосередньо впливає на ефективність роботи СЕУ [14, 15].

На основі проведеного аналізу сформульовано рекомендації щодо вибору обладнання для створення нових або модернізації існуючих систем «судно – вагон-цистерна»:

- суднова складова: впровадження частотно-регульованих приводів вантажних насосів; використання систем утилізації тепла вихлопних газів головних двигунів для підігріву вантажів; встановлення систем моніторингу паливної ефективності.

- берегова складова: обладнання терміналу системами частотного регулювання залізничних насосних станцій; впровадження автоматизованих систем комерційного обліку; використання накопичувальних ємностей для вирівнювання пікових навантажень.

- організаційна складова: запровадження єдиної диспетчерської системи управління; розробка оптимальних режимних карт для різних умов експлуатації; впровадження системи прогнозного аналізу та адаптивного планування.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Отримані результати підтверджують гіпотезу про необхідність розгляду судна та залізничної інфраструктури як єдиного енергетичного ланцюга.

Порівняння з існуючими методами проектування показало перевагу комплексного підходу в питаннях паливної економічності. Встановлено, що оптимізація режимів СЕУ дозволяє не лише економити ресурси, а й подовжувати моторесурс агрегатів.

Результати вказують на важливість використання частотних перетворювачів у системах високої потужності. Виявлені закономірності можуть бути використані для автоматизації процесів на наливних терміналах.

Розроблена комплексна методика дозволяє об'єднати технічні характеристики судна та вагонів-цистерн у спільну модель. Оптимізація режимів роботи судових енергетичних установок забезпечує значне зниження витрати палива.

Встановлено, що ключовим фактором ефективності є підтримка роботи двигунів у зоні мінімальної питомої витрати палива. Результати дослідження є базою для створення нових галузевих стандартів проектування інтермодальних терміналів. Даний підхід відкриває перспективи для подальшого розвитку інтелектуальних транспортних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Sagin A.S., Zablotskiy Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. 2021. № 7-8. P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.

2. Wang K., Wang Y., Liang H. та ін. Ship energy efficiency optimization considering the influences of multiple complex navigational environments: A review // *Marine Pollution Bulletin*. 2025. Vol. 216. 117976. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117976>.

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

4. Sagin S., Kuropyatnyk O. Determination of optimal operating modes of the selective catalytic reduction system for marine diesel exhaust gases // *Technology Audit and Production Reserves*, 2025, 5(3(85)), 12–22. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.340411>.

5. Liu X., Wang K., Guo X. та ін. An integrated energy efficiency optimization method of the wind-assisted hybrid ship for the shipping decarbonization // *Marine Pollution Bulletin*. 2025. Vol. 212. 117579. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117579>.

6. Luo X., Wang J., Wang X., Guan X. Two-stage optimization of route, speed, and energy management for hybrid energy ship under sea conditions // *Energy*. 2025. Vol. 4, No. 3. P. 174–192. DOI: <https://doi.org/10.23919/IEN.2025.0017>.

7. Yang Z., Qu W., Zhuo J. Optimization of energy consumption in ship propulsion control under severe sea conditions // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 9. 1461. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12091461>.

8. Ibrahim A. M., Klevtsov K. M. Optimization of energy efficiency and risk assessment for its implementation in marine multimodal eco-oriented transportation // *Transport Development*. 2025. No. 3(26). DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2025.3-26.02>.

9. Bulgakov M. P., Melnyk O. M., Pulyaev I. O. Innovative technologies and regulatory framework for optimizing energy consumption in maritime transport // *Transport Development*. 2025. No. 2(25). DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2025.2-25.05>.

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

11. Zablotsky Y.V., Sagin S.V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of a Marine Diesel When using Fuel Additives // *Indian J. Sci. Technol.* 2016, 9, 353–362. DOI: [10.17485/ijst/2016/v9i46/107516](https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i46/107516).

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

13. Fomin O., Gorbunov M., Lovska A., Gerlici J., Kravchenko K. Dynamics and Strength of Circular Tube Open Wagons with Aluminum Foam Filled Center Sills // *Materials*. 2021, 14, 1915. <https://doi.org/10.3390/ma14081915>.

14. Sagin S., Kuropyatnyk O., Rusnak D. Improvement of the process of cleaning exhaust gases of marine diesels from sulfur oxides // *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. 4(1(84)), 72–79. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.337616>.

15. Sagin S., Chymshyr V., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Madey V., Rusnak D. Using Ultrasonic Fuel Treatment Technology to Reduce Sulfur Oxide Emissions from Marine Diesel Exhaust Gases // *Energies*. 2025, 18, 4756. <https://doi.org/10.3390/en18174756>.