

© Носовський А.А., Євтушенко М.Ю.

ВИМОГИ ДО УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ПОРТОВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Метою статті є формування вимог до управління технологічними процесами портової інфраструктури. Порти викидають великі об'єми парникових газів та використовують значну кількість енергії для операційної діяльності. Через свої унікальні характеристики проблеми скорочення викидів парникових газів та запобігання глобальному потеплінню не є унікальними для якогось конкретного порту. Крім того, не існує світових стандартів щодо підвищення ефективності портів. Однак розробка вимог до управління технологічними процесами портової інфраструктури вимагає додаткових досліджень. В першу чергу, це стосується врахування особливостей предметної області, а не загальновідомих підходів щодо управління технологічними процесами портової інфраструктури в узагальненому сенсі. Представлений підхід підсумовує основні вимоги, що висувуються до управління технологічними процесами портової інфраструктури, а саме: методи енергозбереження, сучасна ІТ-інфраструктура та використання новітніх технологій в різних ситуаціях, що враховуватимуть попередній досвід використання вказаних складових. Розкриті новітні розробки в галузі технологій, включаючи цифровізацію, морські енергетичні системи, електрифікацію та застосування систем накопичення енергії. Обґрунтовано, що вказані технологічні основи трансформації портової інфраструктури не тільки доцільні, але й надають економічну вигоду. Але автономне застосування технологій, наприклад, відновлюваних джерел енергії, систем накопичення енергії та електрифікованого портового обладнання, має обмежений ефект. Але невідповідність, що існує між теоретичним потенціалом інтегрованої трансформації портів та реальністю фрагментованих, технологічно специфічних впроваджень розглянутих окремих рішень в операційній діяльності портів, вивчатимуться як комплексне, одночасне розгортання в чотирьох технологічних сферах. Технологічна інтеграція електрифікації, Інтернету речей, 5G та інтеграції відновлюваної енергії свідчить, що поєднання даних технологій дає мультиплікативні, а не адитивні переваги і за рахунок інтелектуальної координації між вказаними технологіями дозволяє оптимізації управління технологічними процесами портової інфраструктури.

Ключові слова: інфраструктура, інформаційні технології, енергоефективність, екологічна ефективність, морський транспорт, операційна діяльність, порт, управління, безпека судноплавства, стиснені води, прийняття рішень, морська справа, управління судном, безпека, безпека на морі, навігація, навігаційна безпека

Постановка проблеми. Морський транспорт має ключову роль у світовій системі вантажних перевезень. Він є основою міжнародної торгівлі, забезпечуючи переміщення товарів на значні відстані з відносно низькою вартістю. Понад 80% світових товарів перевозяться морем, морські перевезення є центром міжнародної торгівлі. Як наслідок, з 2018 року споживання енергії морським судноплавством, включаючи портову діяльність, зросло на 10–15% [1].

У цьому контексті зростання портіві термінали як складова портової інфраструктури є критичними вузлами, в яких сходяться морські та наземні компоненти ланцюга поставок, створюючи складний інтермодальний інтерфейс. Технологічні процеси в межах цих вузлів безпосередньо впливають на ефективність, надійність та стійкість усієї транспортної мережі.

Перевантаження, затримки та неефективність технологічних процесів у відповідних транспортних вузлах можуть мати каскадний вплив на весь ланцюг поставок, що призводить до збільшення витрат, зниження якості послуг та додаткового екологічного навантаження на середовище

поблизу порту [2, 3]. Зокрема, на портових терміналах час обороту суден (тобто час, який судно проводить у порту для вантажно-розвантажувальних операцій) став ключовим показником ефективності терміналів. Тривалий час обороту не лише обмежує пропускну здатність порту, але й впливає на графіки судноплавства, знижує продуктивність флоту та сприяє збільшенню викиду відпрацьованих газів як від суден, так і від обладнання порту.

Таким чином, удосконалення роботи портової інфраструктури є актуальним науковим завданням, що веде до підвищення економічності та екологічності морських перевезень та удосконалення ланцюгів поставок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У спеціалізованій літературі для опису еволюції портів та портової інфраструктури використовується п'ять основних етапів [4]. Умовне їх розділення наведено на рис. 1.

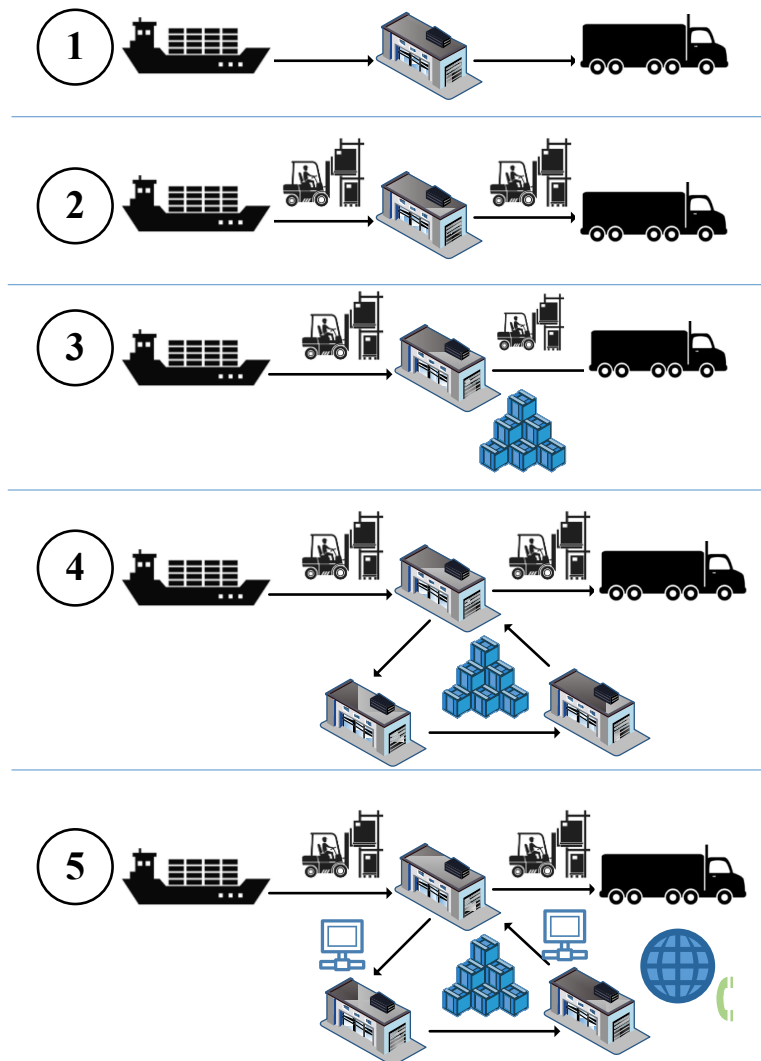


Рисунок 1 – Етапи розвитку портів в частині портової інфраструктури

Згідно з першим етапом, порти є лише вузловими об'єктами, що з'єднують наземні та морські перевезення та надають фундаментальні послуги.

На другому етапі з метою зменшення залежності від фізичної праці, порти почали використовувати просту інфраструктуру та обладнання.

На третьому етапі порти стали центрами обробки вантажів, включаючи розподільні центри, склади та упаковку.

На четвертому етапі з'явилися порти, які функціонують під єдиним управлінням, незважаючи на фізичну відмінність.

Сучасні порти, орієнтовані на клієнтів, представлені п'ятою та поточною фазами. Завдяки таким досягненням, як Інтернет речей (IoT), радіочастотна ідентифікація (RFID), хмарні обчислення, робототехніка, поточна портова інфраструктура є надзвичайно технологічно складною.

У наукових джерелах [5, 6, 7] можна зустріти дослідження енергоефективності та екологічності портів, включаючи розумну електрифікацію, енергоефективність, сталий розвиток та управління енергією в морських портах. Однак, деякі ключові елементи не розглядаються паралельно, включаючи енергетичні та екологічні проблеми, технологічні підходи, операційні стратегії у взаємозв'язку до інфраструктури сучасних портів та впровадження інноваційних технологій.

Крім того, на початку XXI століття було розроблено ряд стратегій для підвищення ефективності портової інфраструктури:

- 1) оптимізації часу обороту суден [8];
- 2) розподілу причалів за допомогою алгоритмів штучного інтелекту [9];
- 3) підвищення ефективності управління складськими майданчиками та агрегації діяльності в різних часових та просторових масштабах [10].

Незважаючи на ці досягнення, існує необхідність побудови інтегрованих моделей, здатних цілісно охопити цілі термінальні системи, особливо в умовах невизначеності для прийняття рішення щодо їх ефективного впровадження.

Метою статті є формування вимог до управління технологічними процесами портової інфраструктури.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Проведений аналіз літературних джерел та умов функціонування портів дозволив виокремити ряд напрямків удосконалення технологічних процесів, які вимагають розробки відповідних вимог.

Слід зауважити, що в межах даного дослідження необхідна інтеграція п'яти складових (рис. 2)

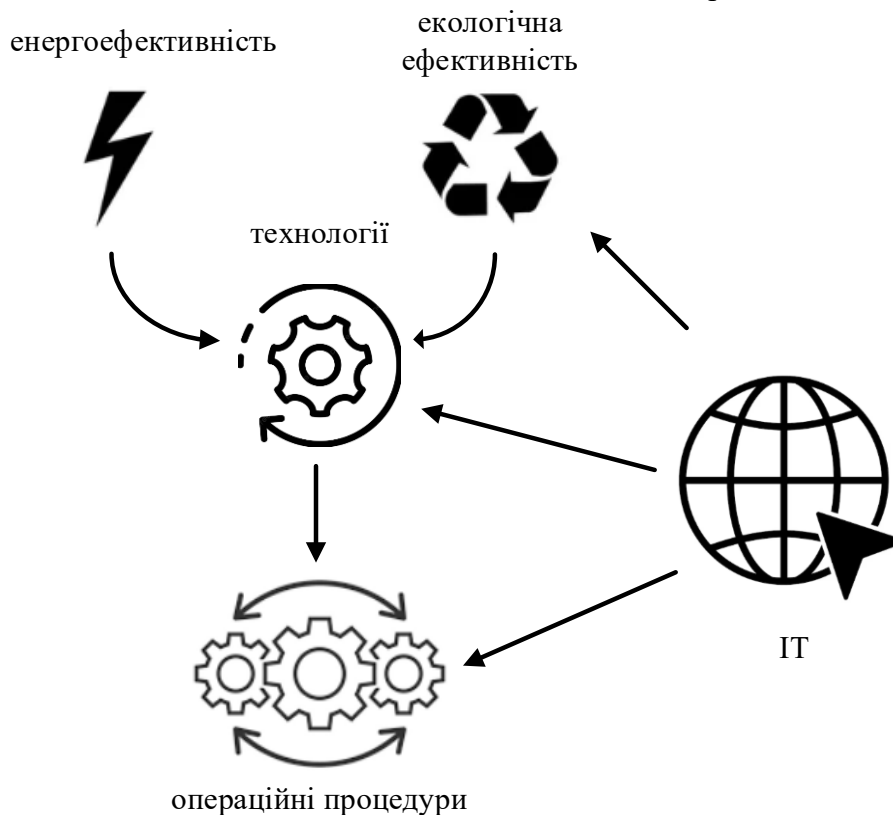


Рисунок 1 – Інтеграція п'яти складових у вимогах до портової інфраструктури

Енергоефективність.

Портова інфраструктура значною мірою залежить від джерел енергії. Основними джерелами енергії є електроенергія та дизельне паливо. Необхідно ефективно керувати своїми енергетичними потребами. Електрифікація портової інфраструктури призводить до зростання рівня автоматизації, підвищення енергоефективності та зменшення викидів парникових газів [11]. З іншого боку, електрифікація портової інфраструктури вимагає збільшення споживання енергії для компенсації енергетичного розриву, що створюється двигунами, які працюють на дизельному паливі. Більший попит на електроенергію може бути не задоволений локальними мережами та вимагає модернізації електричних підстанцій. Споживання потребує ефективного управління енергією та гнучкої енергетичної інфраструктури.

Складові енергоефективності портової інфраструктури представимо у вигляді кортежу:

$$EE = \{NE, NC, Cn, A\} \quad (1)$$

де NE – надійність енергопостачання; NC – стабільність та якість енергомережі; Cn – контроль втрат енергії; A – системи управління енергозбереженням.

Шляхами досягнення енергоефективності (1) є впровадження відновлювальних джерел енергії, інтеграція нових комунікаційних технологій застосування децентралізованих інтегрованих мереж.

Екологічна ефективність.

Важливі екологічні проблеми, з якими мають вирішувати порти, включають сміття, забруднення повітря, шумове забруднення, перевантаження суден та викиди відпрацьованих газів [12]. Морський сектор генерує 2,2%, 15% та 6% виробництва CO_2 , NO_x та SO_x відповідно у світі [13]. Впровадження екологічних заходів та управління портовою діяльністю мають вирішальне значення для вирішення проблеми глобальної зміни клімату та підвищення сприйняття «зеленості» портів. Постійний шум, який виробляється допоміжними двигунами, що працюють на дизельному паливі, вважається шкідливим для здоров'я людей. Вважається, що основним джерелом шуму в портах є допоміжні двигуни, які використовуються для забезпечення енергією пришвартованих суден. Для зменшення шуму можна запровадити адаптивні заходи, зокрема заборонивши суднам використовувати допоміжні двигуни для вироблення енергії під час швартування. Затори на судноплавстві й перевитрата енергії є проблемою, вирішення якої лежить у площині розроблення нових операційних процедур роботи портової інфраструктури.

Операційні процедури портової інфраструктури.

Три основні сектори контейнерних портів – зона складування, причал та берегова зона – є предметом уваги цього дослідження стосовно енергоощадних операцій [14]. Оптимізація енергії на стороні зони складування зосереджена на плануванні та штабелюванні контейнерних перевезень, зокрема на вирішенні проблем з обладнанням для обробки та розподілу місць на станції. У дослідженнях вивчалось споживання енергії та планування роботи портової інфраструктури за допомогою моделей, розроблених для стабілізації їх споживання енергії разом з контролем якості. Моделюючи як дискретні події, так і динамічну поведінку, гібридні методи автоматизації дозволяють знижувати швидкість, споживаючи менше енергії, та працювати протягом тривалішого часу. Наприклад, для завантаження 90 контейнерів може знадобитися близько 65 кВт·год [15].

Двоциклові операції, в яких машини виконують як завантаження, так і розвантаження без переміщення вантажів без порожнього вантажу, забезпечують більшу економію енергії, ніж одноциклові підходи, згідно з енергоефективним плануванням. Додаткові дослідження балансують споживання енергії з робочим часом, враховуючи енергетичні проблеми при розгортанні кранів та управлінні причалами. Енергоефективність також підвищується завдяки використанню водних роботизованих апаратів для міжтермінальних вантажних перевезень. Оптимізатори кранів, оптимізатори дворів та планувальники вантажівок є прикладами передових програм, які використовуються в модернізованих портах для зменшення забруднення та споживання енергії, одночасно збільшуючи виробництво та зменшуючи втрати часу.

ІТ та автоматизація процесів.

Інтеграція цифрових інновацій у «розумні» порти має вирішальне значення для вирішення таких труднощів, як затори в порту та проблеми з орієнтацією, спричинені зростанням кількості морських суден, вантажівок та інших видів інфраструктури в морських портах. Цифрові рішення можуть бути використані для моніторингу та збору інформації з метою підвищення ефективності морських портів, як з екологічної, так і з операційної точки зору. Автономні автомобілі все частіше інтегруються в існуючі системи з використанням цифрових технологій. Це обладнання включає інтелектуальні автономні транспортні засоби та контролери якості. Бездротові датчики та обробка великих даних можуть мінімізувати викиди забруднюючих речовин, експлуатаційні витрати та збої системи, а також можуть покращити безпеку даних, ефективність складів та інтелектуальний контроль енергії. Крім того, цифрові технології, такі як Інтернет речей, можуть бути використані для моніторингу логістики та споживання палива в «розумних» портах. Транспортні компанії та портові споруди можуть використовувати цифровий інформаційний зв'язок для сприяння ефективній комунікації.

Висновки. Комплексний підхід має суттєвий прогрес у трансформації морської портової інфраструктури у кількох технологічних сферах. Так, автономні транспортні засоби на акумуляторних батареях демонструють кращу ефективність використання електроенергії. Впровадження автоматизації операційних процедур зменшує час на одну операцію на 15-20%, а витрату енергії до 10%. Ці досягнення є конкретним доказом того, що технологічні основи трансформації портової інфраструктури не тільки доцільні, але й дедалі більш економічно вигідні.

Доведені синергетичні можливості, що виникають внаслідок поєднання електрифікації, Інтернету речей, 5G та інтеграції відновлюваної енергії. Системи управління енергією на основі мереж за рахунок інтелектуальної координації між відновлюваними джерелами енергії, системами накопичення енергії та електрифікованим портовим обладнанням дозволяє оптимізацію, яку неможливо досягти за допомогою автономних технологій.

Існує невідповідність між теоретичним потенціалом інтегрованої трансформації портів та реальністю фрагментованих, технологічно специфічних впроваджень. Хоча електрифікація, Інтернет речей, 5G та відновлювані джерела енергії широко вивчаються як окремі рішення, розглянуті дослідження демонструють обмежені докази комплексного, одночасного розгортання в цих чотирьох технологічних сферах. Синергетичні переваги одночасного розгортання залишаються значною мірою теоретичними, з обмеженими емпіричними доказами, що демонструють, як ці технології взаємодіють в операційній діяльності.

ЛІТЕРАТУРА

1. UNTACD. Огляд морського транспорту 2024 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2024> (дата звернення: 27 листопада 2025 року).
2. Gu, Y.; Fu, X.; Liu, Z.; Xu, X.; Chen, A. Performance of transportation network under perturbations: Reliability, vulnerability, and resilience. *Transp. Res. Part E Logis. Transp. Rev.* 2020, 133, 101809.
3. Postorino, M.N.; Mantecchini, L.; Malandri, C.; Paganelli, F. A methodological framework to evaluate the impact of disruptions on airport turnaround operations: A case study. *Case Stud. Transp. Pol.* 2020, 8, 429–439.
4. Loukili, A.; Elhaq, S.L. A model integrating a smart approach to support the national port strategy for a horizon of 2030. In Proceedings of the 2018 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA), Tangier, Morocco, 26–27 April 2018; IEEE: New York, NY, USA, 2018; pp. 81–86.
5. Psaraftis, H.N.; Kontovas, C.A. Speed models for energy-efficient maritime transportation: A taxonomy and survey. *Transp. Res. Part C Emerg.* 2013, 26, 331–351.
6. Nunes, R.A.O.; Alvim-Ferraz, M.C.M.; Martins, F.G.; Sousa, S.I.V. Assessment of shipping emissions on four ports of Portugal. *Environ. Pollut.* 2017, 231, 1370–1379.
7. Lu, Y.; Fang, S.; Chen, G.; Niu, T.; Liao, R. Cyber-physical integration for future green seaports: Challenges, state of the art and future prospects. *IEEE Trans. Ind. Cyber-Phys. Syst.* 2023, 1, 21–43.
8. Alamoush, A.S.; Ballini, F.; Ölçer, A.I. Ports' technical and operational measures to reduce greenhouse gas emission and improve energy efficiency: A review. *Mar. Pollut. Bull.* 2020, 160, 111508.
9. Loukili, A.; Elhaq, S.L. A model integrating a smart approach to support the national port strategy for a horizon of 2030. In Proceedings of the 2018 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA), Tangier, Morocco, 26–27 April 2018; IEEE: New York, NY, USA, 2018; pp. 81–86.

10. Belmoukari, B.; Audy, J.F.; Forget, P. Smart port: A systematic literature review. *Eur. Transp. Res. Rev.* 2023, 15, 4.
11. Styhre, L.; Winnes, H.; Black, J.; Lee, J.; Le-Griffin, H. Greenhouse gas emissions from ships in ports—Case studies in four continents. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2017, 54, 212–224.
12. Alamouh, A.S.; Olcer, A.I.; Ballini, F. Ports' role in shipping decarbonization: A common port incentive scheme for shipping greenhouse gas emission reduction. *Clean. Logist. Supply Chain* 2022, 3, 100021.
13. Issa, M.; Ilinca, A.; Ibrahim, H.; Rizk, P. Maritime autonomous surface ships: Problems and challenges facing the regulatory process. *Sustainability* 2022, 14, 15630.
14. Lee, D.H.; Cao, Z.; Meng, Q. Scheduling of two-transtainer systems for loading outbound containers in port container terminals with simulated annealing algorithm. *Int. J. Prod. Econ.* 2007, 107, 115–124.
15. He, J.; Huang, Y.; Yan, W. Yard crane scheduling in a container terminal for the trade-off between efficiency and energy consumption. *Adv. Eng. Inform.* 2015, 29, 59–75.

REFERENCES

1. UNTACD. Maritime Transport Review 2024 [Electronic resource]. Access mode: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2024> (date of access: November 27, 2025).
2. Gu, Y.; Fu, X.; Liu, Z.; Xu, X.; Chen, A. Performance of transportation network under perturbations: Reliability, vulnerability, and resilience. *Transp. Res. Part E Logis. Transp. Rev.* 2020, 133, 101809.
3. Postorino, M.N.; Mantecchini, L.; Malandri, C.; Paganelli, F. A methodological framework to evaluate the impact of disruptions on airport turnaround operations: A case study. *Case Stud. Transp. Pol.* 2020, 8, 429–439.
4. Loukili, A.; Elhaq, S.L. A model integrating a smart approach to support the national port strategy for a horizon of 2030. In Proceedings of the 2018 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA), Tangier, Morocco, 26–27 April 2018; IEEE: New York, NY, USA, 2018; pp. 81–86.
5. Psaraftis, H.N.; Kontovas, C.A. Speed models for energy-efficient maritime transportation: A taxonomy and survey. *Transp. Res. Part C Emerg.* 2013, 26, 331–351.
6. Nunes, R.A.O.; Alvim-Ferraz, M.C.M.; Martins, F.G.; Sousa, S.I.V. Assessment of shipping emissions on four ports of Portugal. *Environ. Pollut.* 2017, 231, 1370–1379.
7. Lu, Y.; Fang, S.; Chen, G.; Niu, T.; Liao, R. Cyber-physical integration for future green seaports: Challenges, state of the art and future prospects. *IEEE Trans. Ind. Cyber-Phys. Syst.* 2023, 1, 21–43.
8. Alamouh, A.S.; Ballini, F.; Ölçer, A.I. Ports' technical and operational measures to reduce greenhouse gas emission and improve energy efficiency: A review. *Mar. Pollut. Bull.* 2020, 160, 111508.
9. Loukili, A.; Elhaq, S.L. A model integrating a smart approach to support the national port strategy for a horizon of 2030. In Proceedings of the 2018 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA), Tangier, Morocco, 26–27 April 2018; IEEE: New York, NY, USA, 2018; pp. 81–86.
10. Belmoukari, B.; Audy, J.F.; Forget, P. Smart port: A systematic literature review. *Eur. Transp. Res. Rev.* 2023, 15, 4.
11. Styhre, L.; Winnes, H.; Black, J.; Lee, J.; Le-Griffin, H. Greenhouse gas emissions from ships in ports—Case studies in four continents. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2017, 54, 212–224.
12. Alamouh, A.S.; Olcer, A.I.; Ballini, F. Ports' role in shipping decarbonization: A common port incentive scheme for shipping greenhouse gas emission reduction. *Clean. Logist. Supply Chain* 2022, 3, 100021.
13. Issa, M.; Ilinca, A.; Ibrahim, H.; Rizk, P. Maritime autonomous surface ships: Problems and challenges facing the regulatory process. *Sustainability* 2022, 14, 15630.
14. Lee, D.H.; Cao, Z.; Meng, Q. Scheduling of two-transtainer systems for loading outbound containers in port container terminals with simulated annealing algorithm. *Int. J. Prod. Econ.* 2007, 107, 115–124.
15. He, J.; Huang, Y.; Yan, W. Yard crane scheduling in a container terminal for the trade-off between efficiency and energy consumption. *Adv. Eng. Inform.* 2015, 29, 59–75.

Nosovsky A. ***REQUIREMENTS FOR THE MANAGEMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF PORT INFRASTRUCTURE**

The purpose of the article is to formulate requirements for the management of technological processes of port infrastructure. Ports emit large volumes of greenhouse gases and use a significant amount of energy for operational activities. Due to their unique characteristics, the problems of reducing greenhouse gas emissions and preventing global warming are not unique to any particular port. In addition, there are no global standards for increasing the efficiency of ports. However, the development of requirements for the management of technological processes of port infrastructure requires additional research. First of all, this concerns taking into account the specifics of the subject area, and not well-known approaches to the management of technological processes of port infrastructure in a generalized sense. The presented approach summarizes the main requirements for the management of technological processes of port infrastructure, namely: energy saving methods, modern IT infrastructure and the use of new technologies in various situations, which will take into account the previous experience of using the specified components. The latest developments in the field of technologies are disclosed, including digitalization, marine energy systems, electrification and the use of energy storage systems. It is substantiated that the specified technological foundations of the transformation of port infrastructure are not only appropriate, but also provide economic benefits. However, the autonomous application of technologies, for example, renewable energy sources, energy storage systems and electrified port equipment, has a limited effect. However, the discrepancy that exists between the theoretical potential of integrated port transformation and the reality of fragmented, technologically specific implementations of the considered individual solutions in port operations will be studied as a complex, simultaneous deployment in four technological areas. The technological integration of electrification, the Internet of Things, 5G and the integration of renewable energy shows that the combination of these technologies provides multiplicative, rather than additive, benefits and, through intelligent coordination between these technologies, allows for the optimization of the management of technological processes of port infrastructure.

Keywords: *infrastructure, information technologies, energy efficiency, environmental efficiency, maritime transport, operational activity, port, management, safety of navigation, restricted waters, decision making, maritime affairs, ship handling, safety, maritime safety, navigation, navigational safety*

Стаття прийнята 20.10.2025