

UDC 656.615: 656.6.088

DOI: 10.31653/2306-5761.39.2026.143-162

SEAPORT AUTOMATION: TECHNOLOGICAL SOLUTIONS, SYSTEMIC CHALLENGES AND REGIONAL SPECIFICS OF IMPLEMENTATION

АВТОМАТИЗАЦІЯ МОРСЬКИХ ПОРТІВ: ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ, СИСТЕ-МНІ ВИКЛИКИ ТА РЕГІОНАЛЬНА СПЕЦИФІКА ВПРОВАДЖЕННЯ

O. Volkov , Ph.D., associate professor, **O. Petrychenko** , Ph.D., associate professor

О.М. Волков, к.т.н., доцент, **О.О. Петриченко**, к.т.н., доцент

National University "Odesa Maritime Academy"

Національний університет «Одеська морська академія»

ABSTRACT

This article offers a comparative analysis of seaport automation, focusing on fully and semi-automated container terminals across the main maritime regions. The study systematizes the technological basis of automation – automated stacking cranes (ASC), automated guided vehicles (AGV), terminal operating systems and digital-twin tools – and links these solutions to engineering reliability, cyber resilience and terminal-level operational efficiency. The analysis distinguishes three dominant regional models: the European evolutionary model, based mainly on gradual semi-automation and social compromise; the North American environmentally driven model, where automation is closely connected with electrification and emissions reduction; and the Asian accelerated-transformation model, represented primarily by large-scale greenfield FACT projects in China. The paper identifies four cross-regional challenges that limit the practical effect of FACT implementation: vulnerabilities of operational technology systems, high capital intensity and long payback periods, weak interoperability between equipment and software suppliers, and the need for systematic workforce retraining. The results show that port automation should be considered not only as the deployment of robotic equipment, but as a complex techno-organizational transformation that requires coordinated engineering, digital, economic and institutional decisions.

Keywords: port automation, container terminal, FACT, automated stacking cranes (ASC), automated guided vehicles (AGV), ship handling, safety of navigation, interoperability, digital twin, cybersecurity.



Copyright© 2026 the Author(s).

This is an open access article under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license.

Published by the National University "Odesa Maritime Academy".

Date received: 27-01-2026

Date accepted: 25-05-2026

Date published (online): 31-05-2026

Cite this article as: O. Volkov, O. Petrychenko, "Seaport automation: technological solutions, systemic challenges and regional specifics of implementation," *Shipping & Navigation*, no. 39, pp. 143-162, 2026, doi: 10.31653/2306-5761.39.2026.143-162.

АНОТАЦІЯ

Стаття присвячена порівняльному аналізу світового досвіду автоматизації морських портів, насамперед повністю та частково автоматизованих контейнерних терміналів. Дослідження систематизує ключові технологічні рішення – автоматизовані штабелюючі крани (ASC), безпілотні транспортні засоби (AGV), операційні системи терміналу та цифрові двійники – і розглядає їх не ізольовано, а у зв'язку з інженерною надійністю, кіберстійкістю та експлуатаційною ефективністю портів комплексів. У роботі виокремлено три домінуючі регіональні моделі автоматизації: європейську еволюційну, що спирається на поетапну модернізацію та соціальний компроміс; північноамериканську екологічно орієнтовану, де автоматизація поєднується з електрифікацією та зменшенням викидів; азійську модель прискореної трансформації, представлену насамперед масштабними китайськими FACT-проектами. Поряд із регіональними відмінностями встановлено чотири універсальні виклики автоматизації: кіберуразливість операційних технологічних систем, високу капіталомісткість і тривалий строк окупності, відсутність єдиних стандартів взаємосумісності обладнання та програмного забезпечення, а також потребу в системній перекваліфікації персоналу. Зроблено висновок, що автоматизація морського порту є не лише впровадженням роботизованого обладнання, а комплексною техніко-організаційною трансформацією, ефективність якої залежить від узгодження інженерних, цифрових, економічних та інституційних рішень.

Ключові слова: автоматизація порту, контейнерний термінал, FACT, ASC, безпілотні транспортні засоби (AGV), обробка суден, безпека судноводіння, взаємосумісність, цифровий двійник, кібербезпека.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями

Сучасний глобальний ринок морських перевезень демонструє стале зростання обсягів контейнерних вантажів, що висуває до портової інфраструктури безпрецедентні вимоги щодо ефективності та пропускної здатності. Збільшення розмірів суден, особливо поява мега-контейнеровозів (клас ULCS – Ultra Large Container Ships), зробило час стоянки судна в порту ключовим фактором економічної доцільності та конкурентоспроможності логістичних ланцюжків. Кожна година простою ULCS коштує судовласнику десятки тисяч доларів, що переносить фокус уваги зі швидкості судноплавства на швидкість обслуговування у порту.

Відповіддю на ці виклики стала глобальна трансформація портової індустрії та перехід до концепції «Розумного порту» (Smart Port) через впровадження автоматизованих контейнерних терміналів (ACT – Automated Container Terminals). Автоматизація дозволяє нівелювати вплив людського фактора, забезпечити цілодобовий режим роботи (24/7) без зниження продуктивності в нічні

зміни та гарантувати стабільність операційних показників, яка є недосяжною для традиційних мануальних терміналів.

Світовий досвід демонструє, що незалежно від обраної стратегії (еволюційної модернізації наявних терміналів чи революційного будівництва нових FACT), автоматизація забезпечує ці переваги, хоча темпи та масштаби впровадження суттєво різняться між регіонами.

Актуальність цього дослідження визначається критичною необхідністю розробки та впровадження високотехнологічних рішень для обслуговування цього нового покоління великотоннажних суден. Традиційні порти, які повністю залежать від ручної праці та класичної техніки, досягли ліміту своєї продуктивності через обмеження, пов'язані з безпекою, графіком роботи персоналу та фізичною втомою. Середній показник продуктивності на кран (MPH – Movements Per Hour) у таких портах рідко перевищує 25–30, тоді як мега-контейнеровози вимагають стабільно високих показників 40–50 MPH для забезпечення економічно виправданого часу обробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Питання автоматизації портової інфраструктури привертає дедалі більшу увагу дослідників – від технічних аспектів надійності обладнання до соціальних наслідків для ринку праці.

Найбільш комплексною емпіричною базою для порівняльного аналізу є дослідження Knatz, Notteboom та Pallis [1], в якому на вибірці з 63 терміналів виявлено відмінні технічні та експлуатаційні характеристики автоматизованих об'єктів. Теоретичне підґрунтя для оцінки стратегій автоматизації закладено у монографії Notteboom, Pallis та Rodrigue [2]. Технологічний вимір автоматизації розкрито у Majoral, Reyes та Saurí [3] на прикладі реальних уроків з автоматизованих терміналів, а підходи до інтегрованого планування роботи причальних кранів, AGV та складських кранів узагальнено у Naem, Gheith та Eltawil [4].

Надійність механічного обладнання в морських умовах досліджено у Zinchenko та співавторів [5], деградацію сенсорів у складних експлуатаційних середовищах – у Liu та співавторів [6]. Кібербезпеку морської цифрової інфраструктури розглянуто у Atmoko та співавторів [7] та стандартах IEC 62443 [8], практичні рекомендації щодо захисту портових систем сформульовано у звіті ENISA [9]. Питання автономного судноплавства та пов'язані з ним ризики висвітлено у Wasilewski та співавторів [10].

Економічна сторона питання представлена у кількох роботах. Соціально-економічні наслідки автоматизації проаналізовано у звіті ITF [11] та Danuser і Kendzia [12]. Капітальні витрати на автоматизацію терміналів порівняно у звіті Drewry [13], а ефективність конкретних проектів у роботі [14]. Вплив автоматизації на операційну ефективність під час пандемії COVID-19 досліджено у Kim, Kim та Kang [15]. Логістичні та управлінські аспекти висвітлено у Rodrigue та Notteboom [16], Sha зі співавторами [17], Heilig та Voß [18], Samarero Orive зі співавторами [19], Ghiara та

Tei [20], Notteboom зі співавторами [21]. Особливості управління рефрижераторними контейнерами та вимоги до холодильної інфраструктури розкрито у Castelein та співавторів [22], а системи запису на ворота як інструмент скорочення вантажних транспортних викидів проаналізовано у Giuliano та O'Brien [23].

Цифрову трансформацію портів та проблему інформаційної фрагментації досліджено у Li [24], архітектуру розумного порту систематизовано у Min [25]. Застосування технології цифрового двійника для оптимізації виробничих операцій терміналу розглянуто у Li та співавторів [26]. Питання геопросторових логістичних платформ та API-архітектури проаналізовано у Kaptsov [27], а інтелектуальні системи оптимізації транспортної логістики – у Drozd [28], [29]. Автономне судноводіння розглянуто у Sagin зі співавторами [30] та Печенюка і Петриченка [31].

Серед українських досліджень питання цифровізації та автоматизації портів висвітлено у роботах Свірідової та Захарченко Ю. [32], Русанової та Перепічко [33], Крамського, Дарушина та Захарченко О. [34], Кулішової зі співавторами [35], [36], Vlasova та Yedemskyi [37], Хаба [38], Воркунової [39], Волкова зі співавторами [40], Кирилової зі співавторами [41], Мурадяна та Демидюкова [42].

Разом з тим у літературі досі бракує комплексного порівняльного аналізу, який би одночасно охоплював технологічні, кібернетичні, економічні та соціальні виміри автоматизації у трьох основних регіонах на єдиній емпіричній базі. Це визначає актуальність та завдання запропонованої статті.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою цієї роботи є порівняльний аналіз технологічних рішень та системних викликів автоматизації морських портів на основі світового досвіду, з особливою увагою до практики китайських портів як найбільш показового прикладу масштабної трансформації портової інфраструктури.

Для досягнення зазначеної мети поставлені такі завдання:

1. Систематизувати та класифікувати технологічні рішення, що застосовуються в автоматизованих контейнерних терміналах різних регіонів світу, з акцентом на архітектуру інтелектуального управління та механічні особливості ключового обладнання (ASC, AGV).

2. Провести порівняльний аналіз регіональних підходів до автоматизації – європейського, азійського та північноамериканського – та визначити специфічні особливості кожної стратегії.

3. Виявити на основі детального вивчення досвіду китайських портів (Яньшань, Тяньцзін, Сямень, Наньша) критичні чинники успіху та характерні труднощі реалізації масштабних проєктів повної автоматизації.

4. Визначити універсальні системні виклики автоматизації, що проявляються незалежно від географічного регіону: технологічні ризики, кібербезпека ОТ-систем, проблема інтероперабельності, економічні бар'єри та соціальні наслідки.

5. Окреслити перспективи розвитку портової автоматизації через призму концепції Smart Port, зокрема роль штучного інтелекту, технології цифрового двійника та зелених технологій.

Об'єктом дослідження є процеси контейнерного перевантаження та внутрішньопортового транспортування у морських контейнерних терміналах. Це включає всі фази руху контейнера: від розвантаження з судна причальними кранами (QC/STS), переміщення по горизонтальній площі (AGV/IGV/Shuttle Carriers), до розміщення та видачі зі штабеля (ASC/RMG). Особлива увага приділяється взаємодії між цими фазами, що визначає загальну пропускну здатність та ефективність порту як єдиної механіко-логістичної системи.

Предметом дослідження є вплив систем автоматизації – автоматизованих систем управління, безпілотних транспортних засобів (AGV), дистанційно керованих кранів та високоточних сенсорів – на ефективність, надійність та стійкість портової діяльності.

Дослідження зосереджене на чотирьох взаємопов'язаних аспектах. Перший – надійність механічних та електронних компонентів в умовах агресивного морського середовища, що безпосередньо визначає ресурс сенсорів і приводів ASC та AGV. Другий – алгоритми управління та диспетчеризації, за допомогою яких програмне забезпечення TOS координує рух сотень автономних одиниць техніки. Третій – кібербезпека ОТ-систем, зокрема вразливості контурів керування кранами та транспортними засобами. Четвертий – економічна доцільність автоматизації як співвідношення між обсягом капітальних вкладень і довгостроковим скороченням операційних витрат.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Нині технології повної або часткової автоматизації застосовуються у провідних морських хабах світу. Їхня географія охоплює ключові вузли глобальної торгівлі й демонструє, що подібні технічні рішення – AGV, ASC, інтелектуальні системи управління та високоточна навігація – реалізуються в різних регіонах за різними стратегічними логіками.

Порівняльний аналіз показує, що при загальній схожості технологій AGV (електроприводи, автономна навігація), різні порти світу обирають різні системи навігації залежно від місцевих умов: європейські порти часто використовують індуктивні кабелі через обмеженість простору та складну конфігурацію терміналів, тоді як нові азійські мегапорти віддають перевагу GPS/RTK та 5G завдяки наявності великих відкритих площ.

Глобальний огляд та локалізацію діючих високотехнологічних перевантажувальних комплексів наведено на рис. 1 [19].

Як видно з рис. 1, найбільша концентрація автоматизованих потужностей спостерігається в регіонах, що формують основу глобальних ланцюгів постачання – Європі, Азійсько-Тихоокеанському регіоні та Північній Америці.

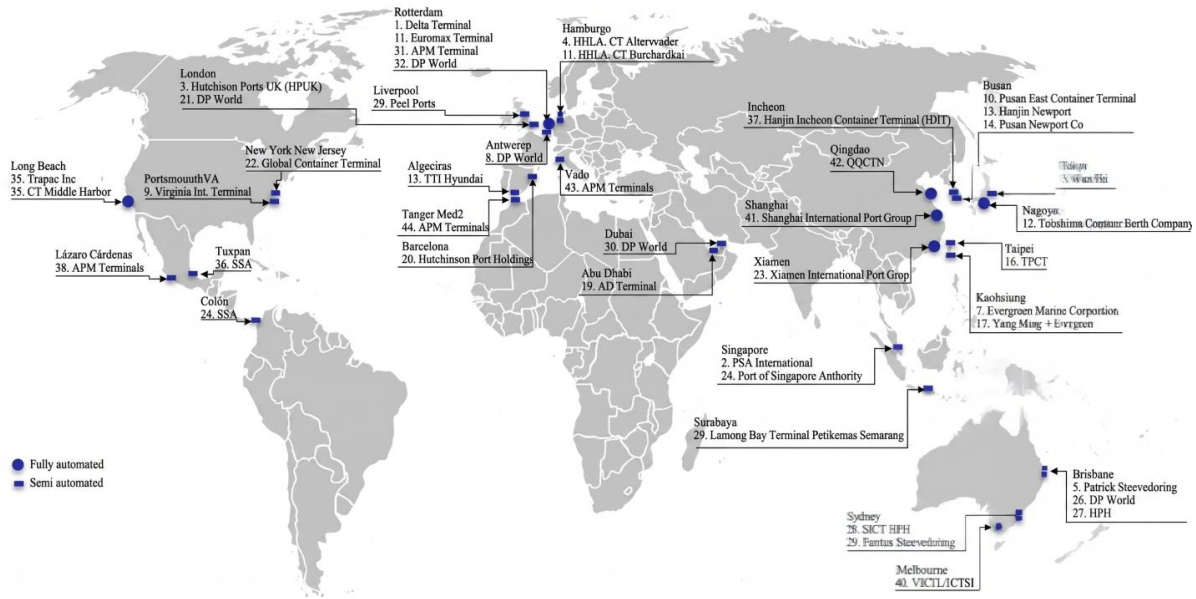


Рис. 1. Глобальна карта розташування повністю автоматизованих та напівавтоматизованих контейнерних терміналів

Аналіз наведених даних дозволяє виділити два найбільш виражені кластери технологічного розвитку. Європейський кластер представлений Роттердамом і Гамбургом, де автоматизація переважно інтегрується в наявну інфраструктуру. Азійський кластер охоплює передусім порти Китаю та Південної Кореї, де створюються нові великомасштабні комплекси для обслуговування надвеликих суден. За ступенем автоматизації об'єкти поділяються на повністю автоматизовані термінали, де автоматизовано як причальні, так і складські операції, та напівавтоматизовані термінали, у яких автоматизоване складування поєднується з традиційним або дистанційним

керуванням причальними перевантажувачами.

Отже, автоматизація перестала бути експериментальним напрямом і стала одним із ключових чинників конкурентоспроможності великих контейнерних терміналів.

Детальна ідентифікація цих об'єктів дозволяє сформувати реєстр діючих автоматизованих потужностей, що включає як пілотні проекти, так і термінали, які вже вийшли на проектну потужність [1]. Узагальнений перелік автоматизованих контейнерних терміналів, згрупованих за географічною ознакою та типом автоматизації, представлено в табл. 1.

Таблиця 1. Основні автоматизовані термінали за емпіричною базою Knatz, Notteboom та Pallis (2022)

Країна	Назва терміналу	Порт	Тип автоматизації
Бельгія	Antwerp Gateway*	Антверпен	Напів
Китай	Xiamen Ocean Gate Terminal*	Сямень	Повна
	Qingdao New Qianwan Container Terminal*	Ціндао	Повна
	Tianjin Port Second Container Terminal*	Тяньцзін	Повна
	Tianjin Port Container Terminal*	Тяньцзін	Повна
	Yang Shan, Phase 4*	Шанхай	Повна
	Hong Kong International Terminals*	Гонконг	Напів
Англія	London Gateway Port*	Стенфорд-ле-Хоуп	Напів
	Liverpool2 Container Terminal	Ліверпуль	Напів
Бельгія	Antwerp Gateway*	Антверпен	Напів
Китай	Xiamen Ocean Gate Terminal*	Сямень	Повна

Продовження таблиці 1

Країна	Назва терміналу	Порт	Тип автоматизації
Китай	Qingdao New Qianwan Container Terminal*	Ціндао	Повна
	Tianjin Port Second Container Terminal*	Тяньцзінь	Повна
	Tianjin Port Container Terminal*	Тяньцзінь	Повна
	Yang Shan, Phase 4*	Шанхай	Повна
	Hong Kong International Terminals*	Гонконг	Напів
Англія	London Gateway Port*	Стенфорд-ле-Хоуп	Напів
	Liverpool2 Container Terminal	Ліверпуль	Напів
Німеччина	CTB Burchardkai*	Гамбург	Напів
	CTA Altenwerder*	Гамбург	Повна
Ірландія	Dublin Ferryport Terminal*	Дублін	Напів
	Belfast Container Terminal*	Белфаст	Напів
Ізраїль	Bayport Haifa*	Хайфа	Напів
	Hadarom Container Terminal	Ашдод	Напів
Італія	APM Vado Ligure*	Вадолігуре	Напів
Японія	Tobishima Container Berth Co., Ltd.*	Нагоя	Повна
	Oi Container Terminal (Berth 6)*	Токіо	Напів
Корея	Pusan Newport International Terminal (PNIT)*	Пусан	Напів
	Pusan Newport Container Terminal (BNCT)*	Пусан	Напів
	Pusan New Port Company (PNC)	Пусан	Напів
	Hanjin New Port Company (HJNC)	Пусан	Напів
	HMM PSA Newport Terminal (HPNT)	Пусан	Напів
	Hanjin Incheon Container Terminal	Інчхон	Напів
Індонезія	Tanju Emas Semarang	Ява	Напів
	Terminal Petikemas	Східна Ява	Напів
Мексика	Tuxpan Port Terminal*	Веракрус	Напів
	APM Lazaro Cardenas*	Ласаро-Карденас	Напів
	New Port Veracruz	Веракрус	Напів
Нідерланди	Rotterdam World Gateway*	Роттердам	Повна
	ECT Delta Terminal	Роттердам	Повна
	ECT Euromax Terminal	Роттердам	Повна
Панама	Manzanillo International Terminal*	Колон	Напів
Сінгапур	PSA Pasir Panjang Terminal, 1–2–3*	Сінгапур	Напів
	PSA Pasir Panjang Terminal, 4–5–6*	Сінгапур	Напів
	Tuas Container Terminal Phase I	Сінгапур	Повна
Іспанія	Barcelona Europe South Terminal (BEST)*	Барселона	Напів
	Total Terminals International	Альхесірас	Напів
ОАЕ	DP World Jebel Ali*	Дубай	Напів
	Khalifa-TIL	Абу-Дабі	Напів
	Khalifa-TIL2	Абу-Дабі	Напів (2024)
	Khalifa Cosco	Абу-Дабі	Напів
США	Long Beach Container Terminal*	Лонг-Біч, СА	Повна
	TraPac*	Лос-Анджелес, СА	Повна
	APM Terminal Pier 400*	Лос-Анджелес, СА	Повна
	Norfolk International Terminal*	Вірджинія	Напів
	Virginia International Gateway*	Вірджинія	Напів
	Global Container Terminal*	NY/NJ	Напів
Марокко	APM Terminals MedPort Tangier	Ксар-ес-Сегіп	Напів
Австралія	Brisbane AutoStrad Terminal	Брисбен	Повна

Продовження таблиці 1

Країна	Назва терміналу	Порт	Тип автоматизації
Австралія	DP World Australia Brisbane Terminal	Брисбен	Напів
	Brisbane Container Terminal	Брисбен	Повна
	Victoria International Container Terminal	Мельбурн	Повна
	Sydney AutoStrad Terminal	Сідней	Повна
	Sydney International Container Terminal	Сідней	Напів
Нова Зеландія	Fergusson Container Terminal	Окленд	Напів
Тайвань	Kaohsiung Intercontinental Terminal (T4)	Гаосюн	Напів
	Kao Ming Container Terminal	Гаосюн	Напів
	Taipei Port Container Terminal	Тайбей	Напів
Саудівська Аравія	Red Sea Gateway Terminal	Джидда	Напів
Індія	Vizhinjam	Візінджам	Напів

Аналіз даних, наведених у табл. 1, демонструє диспропорції у технологічному розвитку різних регіонів світу. Для кількісної оцінки цього розподілу та визначення частки терміналів, що взяли участь у подальшому опитуванні у межах цього дослідження, було сформовано зведену статистику.

У табл. 2 відображено регіональну структуру автоматизованих портів, а також співвідношення між повністю автоматизованими та напівавтоматизованими комплексами у розрізі макрорегіонів.

Як свідчать дані табл. 2, Північна Америка та Азійсько-Тихоокеанський регіон демонструють найвищі показники повної автоматизації (100% та 85,7% серед опитаних терміналів

відповідно), тоді як у Європі переважають рішення з напівавтоматизацією (83,3%). Отримана вибірка є репрезентативною та дозволяє застосувати методи описової статистики для аналізу техніко-експлуатаційних характеристик зазначених терміналів.

Аналіз стану автоматизації контейнерних терміналів засвідчує динамічний розвиток цієї галузі. Станом на середину 2024 року у світі налічувалося 72 контейнерні термінали з повною або частковою автоматизацією. Зважаючи на те, що загальна кількість контейнерних терміналів відповідного масштабу та функціонального призначення становить близько 850 одиниць, автоматизовані об'єкти складають 8,3% від їх загальної чисельності.

Таблиця 2. Кількість відповідей на опитування за регіонами та типом автоматизації терміналів

Регіон	Всього відповідей		Повністю автоматизовані		Напівавтоматизовані	
	К-сть	% від заг.	К-сть	% від заг.	К-сть	% від заг.
Північна Америка	6	100%	3	100%	3	100%
Центральна Америка	3	75.0%	-	-	3	75.0%
Північна Європа / Атлантика	7	63.6%	2	20.0%	5	83.3%
Середземномор'я	3	50.0%	-	-	3	50.0%
Азійсько-Тихоокеанський регіон	12	54.5%	6	85.7%	6	42.9%
Південна Азія / Близький Схід	1	14.3%	-	-	1	14.3%
Всього	32	50.7%	11	61.1%	21	46.6%

Водночас за показником загальної площі автоматизовані термінали охоплюють 14,7% глобального портового простору у перерахунку на гектари. Середня площа контейнерного терміналу становить 51,7 гектара, тоді як для автоматизованих терміналів цей показник сягає 74,7 гектара, що підтверджує тенденцію до автоматизації насамперед великомасштабних портових комплексів [2].

Аналіз даних рис. 2 свідчить, що автоматизовані термінали, маючи лише 8,3% від загальної кількості об'єктів, займають 14,7% сукупної площі. Це підтверджує, що автоматизація насамперед характерна для великомасштабних комплексів, де економічний ефект від високої пропускної здатності може компенсувати значні капітальні витрати.

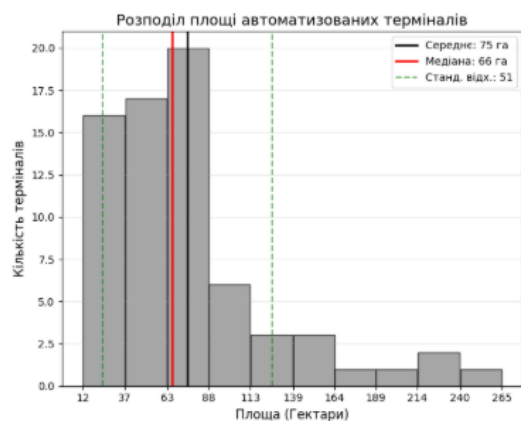


Рис. 2. Аналіз автоматизованих контейнерних терміналів

Для суднобудування та судноводіння автоматизація портів означає зміну вимог до флоту й портово-суднової взаємодії: скорочення часу обробки вантажів підтримує стратегії повільного судноплавства, а інтеграція портових систем із судновими навігаційними комплексами формує основу майбутнього безперервного цифрового транспортного ланцюга.

Досвід європейських, американських і китайських портів має прикладне значення, зокрема для України в контексті повоєнного відновлення портової інфраструктури, оскільки дозволяє зіставити поетапну модернізацію наявних терміналів із будівництвом нових автоматизованих комплексів.

Еволюція контейнерних терміналів може

бути узагальнена через три рівні: традиційні термінали з ручним керуванням основними операціями; напівавтоматизовані комплекси з автоматизованим складським циклом; повністю автоматизовані термінали, де горизонтальне транспортування, штабелювання та значна частина операцій причальної лінії координуються єдиною цифровою системою [43].

1. Ключові технології автоматизації.

Технологічну основу FACT формують три групи рішень. Автоматизовані штабелюючі крани (ASC) забезпечують точне розміщення контейнерів у штабелі, використовуючи сенсорні системи, контролери руху та алгоритми антирозгойдування. Їхня ефективність визначається не лише програмним забезпеченням,



а й ресурсом приводів, гальмівних систем та механічних вузлів у режимі цілодобової експлуатації [2], [43].

Горизонтальне переміщення контейнерів забезпечують AGV та споріднені автономні транспортні засоби. Сучасні рішення дедалі частіше відходять від індуктивних кабелів і магнітних міток на користь GPS/RTK, 5G, лідарів та інерційних датчиків, що підвищує гнучкість маршрутизації, але водночас посилює вимоги до сенсорної надійності та кіберзахисту [15], [6].

Третю групу становлять автоматизовані або дистанційно керовані причальні крани, від синхронності роботи яких залежить час стоянки судна. Саме узгодження ASC, AGV, при-

чальних кранів і TOS перетворює окремі механізми на єдину кібер-фізичну систему терміналу.

Концепція Smart Port дозволяє розглядати цю систему як багаторівневу архітектуру, у якій фізичне обладнання, сенсори, контролери, SCADA, TOS та ERP пов'язані єдиним контуром управління. Модель зрілості такого порту передбачає послідовний перехід від оптимізації та оцифрування до автоматизації, розширеної машинної комунікації, цифрових двійників і систем самонавчання [25].

Архітектура, наведена на рис. 3, демонструє вертикальну інтеграцію від датчиків і виконавчих механізмів до рівня операційного та стратегічного управління портом. Нижні рівні забезпечують безпосереднє керування об-

ладнанням, тоді як TOS та ERP формують логіку планування, ресурсного забезпечення і взаємодії з глобальними логістичними ланцюгами.

Отже, Smart Port доцільно оцінювати не лише за швидкістю перевантаження, а й за здатністю підтримувати цілісність даних, прогнозувати збої, швидко реконфігурувати маршрути техніки та забезпечувати стійкість до кіберфізичних ризиків.

2. Вплив на судноводіння та логістику.

З погляду судноводіння ключовим ефектом автоматизації є скорочення часу стоянки судна. Вища передбачуваність вантажних операцій підвищує точність планування суднозаходів, зменшує ризик портових заторів і створює передумови для інтеграції портових TOS

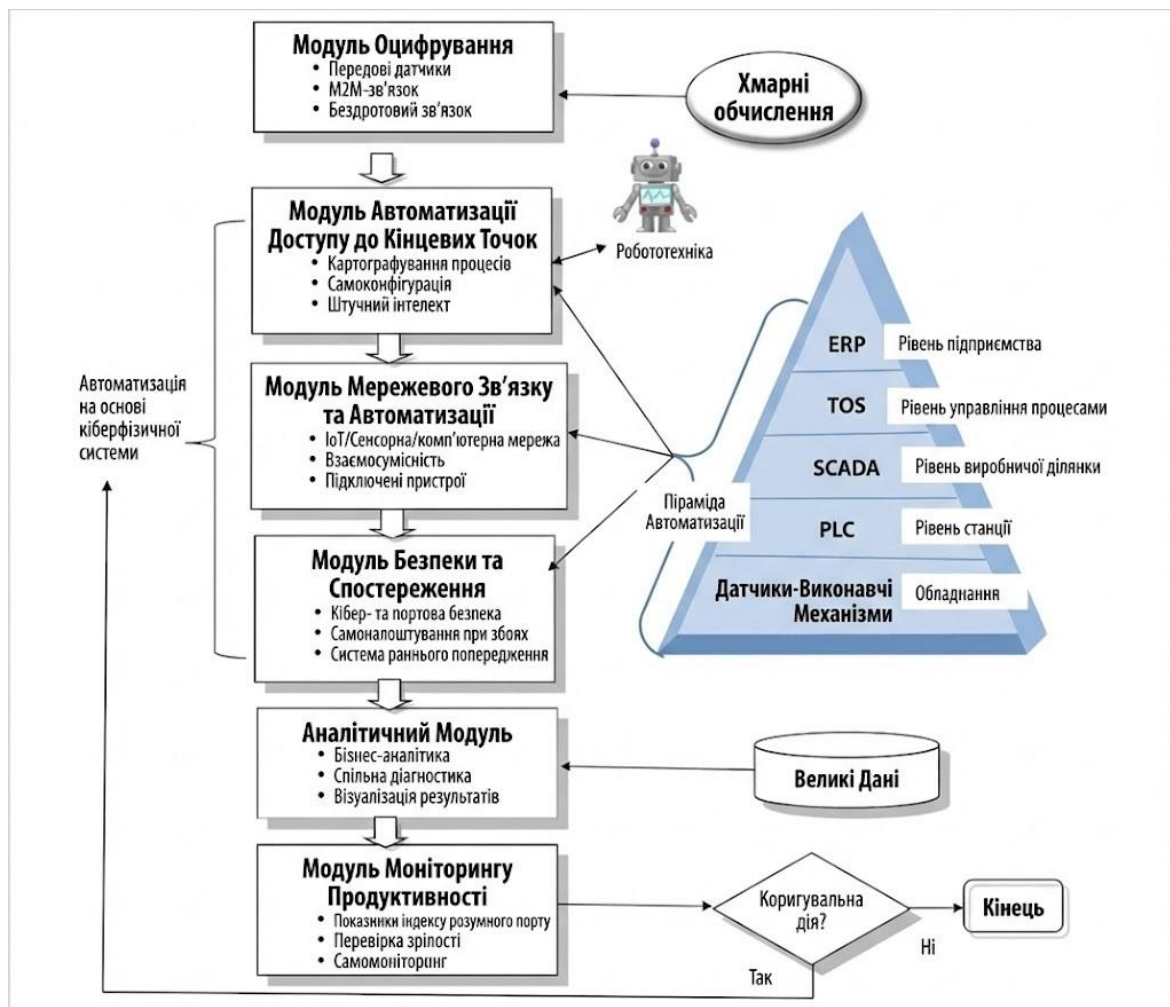


Рис. 3. Базова архітектура прототипу «розумного порту» та піраміда автоматизації [25]

із судновими навігаційними та енергетичними системами [15], [6], [3].

3. Порівняльний аналіз світового досвіду автоматизації: регіональні стратегії та досвід китайських портів.

Регіональні моделі автоматизації.

У межах наявної емпіричної бази доцільно виділяти кілька регіональних підходів до автоматизації, але основний масив практик формують три моделі: європейська еволюційна, азійська прискорена та північноамериканська екологічно орієнтована. Саме вони охоплюють переважну більшість автоматизованих терміналів і визначають різні траєкторії розвитку галузі.

Європейська модель представлена Роттердамом, Гамбургом та Антверпеном. Вона спирається на модернізацію наявної інфраструктури, активне використання напівавтоматизації та необхідність узгодження технологічних змін із профспілками, міським середовищем і просторовими обмеженнями портових територій.

Північноамериканська модель, зокрема Long Beach Container Terminal, TraPac і APM Terminal Pier 400, поєднує автоматизацію з екологічними вимогами. Тут технологічні рішення часто обґрунтовуються не лише продуктивністю, а й необхідністю електрифікації обладнання, зменшення викидів та виконання регіональних природоохоронних стандартів.

Азійська модель, найвиразніше представлена Китаєм, базується на будівництві великих автоматизованих терміналів на нових майданчиках. Державна підтримка, масштаб вантажопотоків і доступність територій дозволяють впроваджувати повну автоматизацію швидше, ніж у більшості європейських і північноамериканських портів.

4. Китайські порти як приклади прискореної автоматизації.

Китайські порти демонструють різні варіанти реалізації азійської моделі. Яньшань показує переваги масштабного greenfield-проекту з високою щільністю роботизованих операцій; Тяньцзінь поєднує автоматизацію з енергоефективністю та «зеленими» рішеннями; Сямень ілюструє гнучку напівавтоматизацію з дистанційним керуванням; Наньша є прикладом переходу до супутникової та бездротової навігації AGV без залежності від магнітних міток у покритті [7], [17], [21].

5. Європейський та американський досвід.

Європейський та американський досвід підтверджує, що автоматизація не має єдиного універсального сценарію. Роттердам демонструє поетапне поєднання автоматизованого складування з дистанційним керуванням причальними операціями, тоді як Long Beach Container Terminal ілюструє модель, у якій повна автоматизація тісно пов'язана з екологіч-

Таблиця 3. Порівняльні характеристики автоматизованих контейнерних терміналів

Показник	Повна автоматизація (FACT)	Напівавтоматизація	Джерело
Продуктивність (МРН)	40–42	32–35	[3], [26], [14]
Площа терміналу (га)	98,6 (середнє)	84,1 (середнє)	[2]
Довжина причалів (м)	1506 (середнє)	1504 (середнє)	[1]
Максимальна глибина (м)	16,8 (середнє)	15,7 (середнє)	[2]
Вантажооборот (млн TEU/рік)	2–4 (типовий діапазон)	2–3 (типовий діапазон)	[1]
Термін окупності ROI	>6 років (61% терміналів)	>6 років (61% терміналів)	[2]
Скорочення викидів CO ₂ (%)	~45–50*	~50–55*	[14]

Примітка: * – для повністю електрифікованих терміналів; Long Beach (США) досягає 80% [14]

ними стандартами, електрифікацією обладнання та береговим живленням суден. Отже, Азія орієнтується передусім на масштаб і пропускну здатність, Європа – на адаптацію наявних терміналів, а Північна Америка – на екологічну відповідність.

Для систематизації результатів порівняльного аналізу регіональних моделей автоматизації у табл. 3 наведено ключові техніко-економічні показники провідних терміналів кожного регіону.

Аналіз даних табл. 3 підтверджує відсутність жорстких технічних порогів для автоматизації. FACT у середньому на 17,2% більші за площею (98,6 га проти 84,1 га), однак довжина причалів у повністю та напівавтоматизованих терміналів майже однакова – 1506 м проти 1504 м. Це свідчить, що повна автоматизація не обов'язково потребує принципово іншої причальної інфраструктури; вирішальним є рівень інтеграції внутрішньотермінальних процесів. Водночас 61% автоматизованих терміналів повертають інвестиції лише після шести років експлуатації, а 29% – у межах п'яти-шести років [1].

6. Критичний аналіз проблем та недоліків автоматизації.

Повна автоматизація портового терміналу перетворює його на високоінтегровану кіберфізичну систему, у якій збій окремого цифрового або механічного компонента може вплинути на весь операційний цикл [33]. Тому ключові ризики FACT пов'язані не лише з продуктивністю обладнання, а й із кібер-

безпекою, відмовостійкістю, взаємосумісністю та економічною доцільністю.

Найбільш критичним ризиком є кіберуразливість ОТ-систем. TOS, системи керування AGV, ASC та причальними кранами мають бути захищені не тільки як IT-інфраструктура, а як контури безпосереднього управління механізмами. Атака NotPetya на термінал АРМ у Роттердамі у 2017 році, а також інциденти в інших портах підтверджують, що порушення кіберстійкості здатне паралізувати роботу терміналу та спричинити значні економічні втрати [7], [9], [8].

Інженерна відмовостійкість залишається другою групою ризиків. AGV, ASC, сенсорні системи, приводи, гальмівні вузли та комунікаційні канали працюють у режимі високого навантаження, тому мають проєктуватися з урахуванням швидкої діагностики, модульної заміни компонентів і резервних режимів керування. Навіть мілісекундні збої в синхронізації між краном і транспортним засобом можуть призводити до затримок або потреби у втручанні оператора [6], [21], [29].

Третя проблема – взаємосумісність. У практиці портового будівництва TOS, кранове обладнання, AGV, сенсорні системи та засоби кіберзахисту часто постачаються різними виробниками. Відсутність єдиних стандартів обміну даними змушує операторів створювати індивідуальні інтеграційні рішення, що підвищує вартість проєкту, ускладнює технічне обслуговування та збільшує ризик каскадних збоїв [43; 24; 27; 16]. Саме тому аналіз

Таблиця 4. Розподіл автоматизованих терміналів за типом оператора та рівнем автоматизації

Тип оператора	Повністю автоматизовані	Напівавтоматизовані	Всього терміналів	Частка від загальної кількості (%)
Стивідорні компанії	11	28	39	61,9%
Перевізники	4	10	14	22,2%
Фінансові холдинги	0	6	6	9,5%
Консорціуми / Спільні підприємства	3	1	4	6,3%
ВСЬОГО	18	45	63	100%

суб'єктів, які ініціюють та фінансують автоматизацію, є необхідним для розуміння реальної динаміки галузі.

Аналіз корпоративної структури власників автоматизованих терміналів дозволяє виявити основних драйверів технологічного прогресу в галузі [1]. У цьому дослідженні оператори класифікуються на три основні категорії: перевізники, фінансові холдинги та чисті стивідорні компанії. Розподіл 63 діючих автоматизованих терміналів за типом оператора та рівнем автоматизації наведено в табл. 4.

Дані табл. 4 свідчать, що головними драйверами автоматизації є не судноплавні лінії, а незалежні стивідорні компанії: вони керують 39 терміналами, або 61,9% досліджуваної вибірки. Морські перевізники посідають друге місце з 14 терміналами (22,2%), тоді як фінансові холдинги діють обережніше й переважно інвестують у напівавтоматизовані рішення [1]. Такий розподіл підтверджує, що автоматизація формується не тільки логікою вертикальної інтеграції перевізників, а й стратегіями незалежних операторів, які контролюють термінальні активи.

Економічні та соціальні бар'єри також мають системний характер. Впровадження FACS потребує одночасних інвестицій у роботизовану техніку, сенсори, енергетичну інфраструктуру, мережі зв'язку та спеціалізоване програмне забезпечення, тому строк окупності часто перевищує шість років [1], [13], [40]. Автоматизація зменшує потребу у фізичній праці, але підвищує попит на інженерів, операторів дистанційного керування, фахівців із діагностики та кібербезпеки. Без програм перекваліфікації це створює ризик соціальних конфліктів і дефіциту персоналу, здатного обслуговувати складні кібер-фізичні системи [11; 24; 36].

Експлуатаційні виклики проявляються вже після запуску автоматизованого терміналу. Складні метеорологічні умови, зокрема туман, злива, сильний вітер або соляний аерозоль, знижують точність оптичних сенсорів і підвищують навантаження на кранові сис-

теми. Внаслідок цього автоматизоване обладнання змушене переходити на обмежені режими роботи, що частково нівелює очікуваний приріст продуктивності.

Крім того, висока щільність контейнерного штабеля потребує безперервного динамічного планування. TOS має в реальному часі оптимізувати маршрути AGV, уникати конфліктів руху, мінімізувати подвійні переміщення та оперативно реагувати на зміну пріоритетів суднозаходу [4; 28; 18]. Це підтверджує, що автоматизація є не разовим технічним впровадженням, а постійним процесом підтримки механічної, алгоритмічної та організаційної стійкості.

Перспективи розвитку автоматизації портів пов'язані з подальшим переходом від жорстко запрограмованих систем до інтелектуальних кібер-фізичних комплексів. Штучний інтелект і цифрові двійники дозволяють прогнозувати попит, тестувати сценарії роботи AGV та ASC, виявляти «вузькі місця» і навчати персонал без ризику для реального терміналу [26].

Другим напрямом є енергоефективність і включення портів до «зелених коридорів». Електричні та перспективні водневі транспортні засоби, берегове живлення суден, оптимізація споживання енергії та системи попереднього запису вантажних автомобілів на ворота можуть зменшити викиди у портовій зоні [23]. У довшій перспективі автоматизований порт має бути інтегрований із судовими навігаційними системами та системами автономного судноплавства, що потребує уніфікованих протоколів обміну даними між TOS і судовими інформаційними комплексами [30], [31].

7. Наукова новизна дослідження.

Наукова новизна цього дослідження полягає у систематизації та порівняльному зіставленні регіональних моделей автоматизації морських портів на єдиній емпіричній основі.

По-перше, узагальнено три домінуючі моделі автоматизації – європейську еволюційну, північноамериканську екологічно орієнтовану та

азійську прискорену – і показано, що їхні відмінності мають не лише технологічний, а й інституційний характер. Темпи впровадження FACT залежать від структури власності, державної підтримки, просторових обмежень і механізмів соціального погодження.

По-друге, на основі розподілу 63 терміналів за типом оператора обґрунтовано, що незалежні стивідорні компанії є ключовими драйверами автоматизації: їм належать 61,9% досліджуваних об'єктів. Це коригує поширене уявлення про домінування судноплавних ліній у технологічній трансформації термінального бізнесу.

По-третє, зіставлення FACT і напівавтоматизованих терміналів виявило, що повна автоматизація не вимагає принципово іншої довжини причальної лінії, однак пов'язана з більшими площами терміналу, вищими вимогами до внутрішньої координації та тривалим строком окупності інвестицій.

По-четверте, систематизовано універсальні виклики автоматизації – кібербезпеку ОТ-систем, інтероперабельність, капітальні бар'єри та соціальні наслідки – і показано, що жоден із них не є суто технічним. Вони потребують одночасно інженерних, організаційних і регуляторних рішень.

По-п'яте, досвід портів Наньша та Тяньцзінь використано для фіксації переходу від інфраструктурно залежних систем навігації AGV до супутникових і бездротових рішень, що знижує залежність терміналу від спеціально підготовленого покриття та має практичне значення для проєктування нових FACT.

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

Проведене дослідження показало, що автоматизація морських портів є комплексною техніко-організаційною трансформацією, а не лише впровадженням роботизованого обладнання. Її результативність визначається узгодженістю механічних систем, цифрової інфраструктури, кіберзахисту, структури власності та соціальної політики оператора.

Порівняльний аналіз дозволив виділити три основні регіональні моделі. Європейська модель ґрунтується на поетапній модернізації наявних терміналів і соціальному погодженні; північноамериканська – на поєднанні автоматизації з екологічними стандартами та електрифікацією; азійська, насамперед китайська, – на швидкому будівництві великих FACT на нових майданчиках за умов державної підтримки.

Кількісні результати підтверджують, що автоматизація характерна передусім для великих термінальних комплексів: автоматизовані термінали становлять 8,3% від кількості контейнерних терміналів, але охоплюють 14,7% їхньої сукупної площі. Водночас повна автоматизація не знімає економічних бар'єрів: для більшості терміналів строк окупності перевищує шість років.

Встановлено, що ключовими драйверами автоматизації є незалежні стивідорні компанії, які контролюють 61,9% досліджуваних автоматизованих терміналів. Це свідчить, що технологічна трансформація портів формується не лише вертикально інтегрованими судноплавними лініями, а й незалежними операторами, зацікавленими у довгостроковому підвищенні ефективності термінальних активів.

Найбільш суттєвими обмеженнями FACT залишаються кіберуразливість ОТ-систем, відсутність єдиних стандартів інтероперабельності, висока капіталомісткість, залежність від кваліфікованого інженерного персоналу та соціальні наслідки автоматизації. Ці проблеми мають системний характер і не можуть бути вирішені лише вибором сучаснішого обладнання.

Подальший розвиток портової автоматизації пов'язаний із цифровими двійниками, штучним інтелектом, енергоефективними технологіями та інтеграцією портових TOS із судовими навігаційними системами. Саме ці напрями можуть забезпечити перехід від автоматизованих, але відносно жорстких комплексів до адаптивних кібер-фізичних систем.

Для України результати дослідження мають прикладне значення у контексті повоєнного

відновлення портової інфраструктури. Найбільш реалістичною видається гібридна стратегія: поетапна автоматизація наявних терміналів за європейським зразком у поєднанні з проєктуванням нових високотехнологічних потужностей там, де це економічно та просто-риво обґрунтовано.

Обмеження дослідження пов'язані з неповнотою відкритих технічних даних щодо окремих китайських портів і різним рівнем деталізації фінансових показників у публічних джерелах. Перспективними напрямками подальших досліджень є моделювання автоматизованих терміналів на основі цифрових двійників, аналіз телеметричних даних обладнання та кібер-фізичне тестування ОТ-систем.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Knatz G., Notteboom T., and Pallis A. A., "Container terminal automation: revealing distinctive terminal characteristics and operating parameters," *Maritime Economics & Logistics*, vol. 24, no. 3, pp. 537–565, 2022, doi: 10.1057/s41278-022-00240-y
- [2] Notteboom T., Pallis A., and Rodrigue J.-P., *Port Economics, Management and Policy*. New York, NY, USA: Routledge, 2022, doi: 10.4324/9780429318184#TEXT
- [3] Majoral G., Reyes A., and Sauri S., "Lessons from reality on automated container terminals: What can be expected from future technological developments?," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2678, no. 4, pp. 1–15, Apr. 2024, doi: 10.1177/03611981231174422
- [4] Naeem D., Gheith M., and Eltawil A., "A comprehensive review and directions for future research on the integrated scheduling of quay cranes and automated guided vehicles and yard cranes in automated container terminals," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 179, Art. no. 109149, May 2023, doi: 10.1016/j.cie.2023.109149
- [5] Zinchenko S., Tovstokoryi O., Ben A., Nosov P., Popovych I., and Nahrybelnyi Y., "Automatic optimal control of a vessel with redundant structure of executive devices," in *Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making*, Babichev S. and Lytvynenko V., Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2022, pp. 266–281, doi: 10.1007/978-3-030-82014-5_18
- [6] Liu Q., Wang Y., Zhao F., Zheng C., and Xie J., "A review of the research progress of sensor monitoring technology in harsh engineering environments," *Sensors*, vol. 25, no. 20, Art. no. 6308, Oct. 2025, doi: 10.3390/s25206308
- [7] Atmoko R. A., Arfianto A. Z., Hasin M. K., Rahmat M. B., and Kurniawan L. A., "Cybersecurity in digital maritime infrastructure," in *Maritime Infrastructure for Energy Management and Emission Reduction Using Digital Transformation*, Elsisu M., Rinanto N., and Su C.-L., Eds. Singapore: Springer, 2025, pp. 127–183, doi: 10.1007/978-981-96-4438-4_6
- [8] IEC, IEC 62443 Series: Security for Industrial Automation and Control Systems. Geneva, Switzerland: IEC.
- [9] Drougkas A., Sarri A., Kyranoudi P., and Zisi A., *Port Cybersecurity: Good Practices for Cybersecurity in the Maritime Sector*, Tech. Rep. Heraklion, Greece: European Union Agency for Cybersecurity (ENISA), 2019. [Online]. Available: <https://www.enisa.europa.eu/publications/port-cybersecurity-good-practices-for-cybersecurity-in-the-maritime-sector>. Accessed: Jul. 7, 2020.
- [10] Wasilewski W., Wolak K., and Zaráś M., "Autonomous shipping. The future of the maritime industry?," *Zeszyty Naukowe Małopolskiej Wyższej Szkoły Ekonomicznej w Tarnowie*, vol. 51, no. 3, pp. 155–163, Sep. 2021, doi: <https://doi.org/10.25944/znmwse.2021.03.155163>

- [11] International Transport Forum (ITF), *The Economic and Social Impact of Automation in Ports*, ITF Research Report. Paris, France: OECD Publishing, 2019.
- [12] Danuser Y. and Kendzia M. J., "Technological advances and the changing nature of work: Deriving a future skills set," *Advances in Applied Sociology*, vol. 9, no. 10, pp. 463–477, 2019, doi: 10.4236/aasoci.2019.910034
- [13] Drewry Maritime Research, *Capital Expenditure Benchmarking in Automated Container Terminals*, Research Report. London, U.K.: Drewry Publishing, 2022.
- [14] P. W. de Langen, R. van den Berg, and A. Willeumier, "A new approach to granting terminal concessions: the case of the Rotterdam World Gateway terminal," *Maritime Policy & Management*, vol. 39, no. 1, pp. 79–90, 2012, DOI: 10.1080/03088839.2011.642311
- [15] Kim B., Kim G., and Kang M., "Study on comparing the performance of fully automated container terminals during the COVID-19 pandemic," *Sustainability*, vol. 14, no. 15, Art. no. 9415, Aug. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/su14159415>
- [16] Rodrigue J.-P. and Notteboom T., "Automation in container port systems and management," *T.R. News*, no. 334, pp. 20–26, Jul.–Aug. 2021.
- [17] Sha M., Notteboom T., Zhang T., Zhou X., and Qin T., "Simulation model to determine ratios between quay, yard and intra-terminal transfer equipment in an integrated container handling system," *Journal of International Logistics and Trade*, vol. 19, no. 1, pp. 1–18, 2021.
- [18] Heilig L. and Voß S., "Inter-terminal transportation: an annotated bibliography and research agenda," *Flexible Services and Manufacturing Journal*, vol. 29, no. 1, pp. 35–63, 2017, doi: 10.1007/s10696-016-9237-7
- [19] Camarero Orive A., Parra Santiago J. I., Esteban-Infantes Corral M. M., and González-Cancelas N., "Strategic analysis of the automation of container port terminals through BOT (Business Observation Tool)," *Logistics*, vol. 4, no. 1, Art. no. 3, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/logistics4010003>
- [20] Ghiara H. H. and Tei A., "Port activity and technical efficiency: determinants and external factors," *Maritime Policy & Management*, vol. 48, no. 5, pp. 711–724, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.1080/03088839.2021.1872807>
- [21] Notteboom T. T., Pallis T., and Rodrigue J.-P., "Disruptions and resilience in global container shipping and ports: the COVID-19 pandemic versus the 2008–2009 financial crisis," *Maritime Economics & Logistics*, vol. 23, no. 2, pp. 179–210, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.1057/s41278-020-00180-5>
- [22] Castelein B., Geerlings H., and Van Duin R., "The reefer container market and academic research: A review study," *Journal of Cleaner Production*, vol. 256, Art. no. 120654, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120654
- [23] Giuliano G. and O'Brien T., "Reducing port-related truck emissions: The terminal gate appointment system at the Ports of Los Angeles and Long Beach," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 12, no. 7, pp. 460–473, Oct. 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.06.004>
- [24] Li X., "Trends and prospects of port digital transformation," *Highlights in Business, Economics and Management*, 2024, doi: <https://doi.org/10.54097/fqpgy243>
- [25] Min H., "Developing a smart port architecture and essential elements in the era of Industry 4.0," *Maritime Economics & Logistics*, vol. 24, no. 2, pp. 189–207, Jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.1057/s41278-022-00211-3>
- [26] Li F. Y., Chang D., Gao Y., Zou Y., and Bao C., "Automated container terminal

- production operation and optimization via an AdaBoost-based digital twin framework," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2021, Art. no. 1936764, Sep. 2021, doi: <https://doi.org/10.1155/2021/1936764>
- [27] Kaptsov L., "RESTful API design for geospatial logistics platforms using TypeScript and Laravel," *Journal of Information, Technology and Policy*, 2025, doi: <https://doi.org/10.62836/jitp.2025.515>
- [28] Bershchanskyi Y., Klym H., and Shevchuk Y., "Containerized Artificial Intelligent System Design in Cloud and Cyber-Physical Systems," *Advances in Cyber-Physical Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 151–157, 2024, doi: <https://doi.org/10.23939/acsps2024.02.151>
- [29] Drozd A., "Intelligent systems for transport logistics optimisation: Algorithms, architecture, and legal aspects," in *Proc. Int. Conf. Economic Sciences and Management in the Changing World 2025 (ICESMCM 2025)*, no. 5, Nov. 2025, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17550734>
- [30] Sagin S., Kuropyatnyk O., and Tkachenko I., "Providing of the sea vessels ecological exploitation," in *Proc. V Int. Maritime Sci. Conf. MPP&O-2024*, Odesa, Ukraine, 2024, pp. 145–147.
- [31] Pechenyuk A. and Petrychenko O., "Prediction of safe maneuvers in restricted waters as problem of navigation and ship hydrodynamics," in *Transport Means – Proc. Int. Conf.*, vol. 25, 2021, pp. 239–244.
- [32] С. С. Свірідова та Ю. О. Захарченко, "Основні шляхи та резерви потенціалу розвитку морських портів України," *Економіка: реалії часу*, № 5(57), с. 91–98, 2021, doi: [10.5281/zenodo.6075998](https://doi.org/10.5281/zenodo.6075998). [Електронний ресурс].
- [33] Русанова С. та Перепічко М., "Моделі управління морськими портами: світові практики," *Економіка та суспільство*, no. 61, p. 102, 2024, doi: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-61-102>
- [34] С. Крамський, О. Дарушин, та О. Захарченко, "Сталий інноваційний розвиток морських портів у вимірі безпекових загроз і турбулентності," *Grail of Science*, № 57, с. 281–293, 2025, doi: [10.36074/grail-of-science.17.10.2025.026](https://doi.org/10.36074/grail-of-science.17.10.2025.026).
- [35] Shevchuk Y., "Risk management and compliance strategies for legacy IT infrastructure," *The American Journal of Engineering and Technology*, vol. 7, no. 8, pp. 85–91, 2025, doi: <https://doi.org/10.37547/tajet/Volume07Issue08-10>
- [36] Kulishova O. O., Kotenko V. V., and Yakovtsev S. S., "Perspectives of introducing digital technologies into the operational safety management processes of seaports," *Tavryiskyi Naukovyi Visnyk. Serii: Ekonomika*, no. 11, pp. 76–85, Jan. 2022, doi: <https://doi.org/10.32851/2708-0366/2022.11.11>
- [37] Vlasova V. and Yedemskyi Y., "Problems and perspectives of development of sea ports on the Danube," *Ekonomika i Upravlinnia*, no. 43–44, pp. 116–122, Dec. 2018. [Online]. Available: <https://journals.duit.edu.ua/index.php/economy/article/view/1000>
- [38] Хаб О., "Аналіз економічного потенціалу морських портів України в умовах реалізації інноваційних можливостей," *Economic Analysis*, vol. 29, pp. 192–199, 2019, doi: <https://doi.org/10.35774/econa2019.01.192>
- [39] Воркунова О., "Використання інформаційних технологій у діяльності морських портів," *Development of Management and Entrepreneurship Methods on Transport (ONMU)*, 2024, doi: <https://doi.org/10.31375/2226-1915-2024-4-24-34>
- [40] Волков О. М., Петриченко О. О. та Влащенко Е. А., "Hazards of using

autonomous vessels," Судноводіння, no. 34, pp. 20–32, 2023.

- [41] Кириллова О. В., Кириллова В. Ю. та Магамадов О. Р., "Поняття «Smart Port» у контексті глобальних тенденцій інтеграції інтелектуальних транспортних та інформаційних технологій у портовій індустрії," Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки, vol. 35, no. 74, pp. 81–86, 2024, doi: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/14>
- [42] Мурад'ян А. О. та Демидюков О. В., "Перспективи розвитку вантажного обслуговування та особливості його використання в умовах автоматизації портових терміналів," Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту, no. 208, pp. 207–214, 2024, doi: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.208.2024.308732>
- [43] Vernadat G. F. B., Molina A., Panetto H., and Weichhart G., "Interoperability Challenges in Collaborative and Automated Systems," in *Interoperability Principles and Standards: Applications to Collaborative and Automated Systems*. Cham, Switzerland: Springer, 2025, ch. 2, pp. 19–79, doi: [10.1007/978-3-031-81497-6_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-81497-6_2)
- [4] Naeem D., Gheith M., and Eltawil A., "A comprehensive review and directions for future research on the integrated scheduling of quay cranes and automated guided vehicles and yard cranes in automated container terminals," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 179, Art. no. 109149, May 2023, doi: [10.1016/j.cie.2023.109149](https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109149)
- [5] Zinchenko S., Tovstokoryi O., Ben A., Nosov P., Popovych I., and Nahrybelnyi Y., "Automatic optimal control of a vessel with redundant structure of executive devices," in *Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making*, Babichev S. and Lytvynenko V., Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2022, pp. 266–281, doi: [10.1007/978-3-030-82014-5_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-82014-5_18)
- [6] Liu Q., Wang Y., Zhao F., Zheng C., and Xie J., "A review of the research progress of sensor monitoring technology in harsh engineering environments," *Sensors*, vol. 25, no. 20, Art. no. 6308, Oct. 2025, doi: [10.3390/s25206308](https://doi.org/10.3390/s25206308)
- [7] Atmoko R. A., Arfianto A. Z., Hasin M. K., Rahmat M. B., and Kurniawan L. A., "Cybersecurity in digital maritime infrastructure," in *Maritime Infrastructure for Energy Management and Emission Reduction Using Digital Transformation*, Elsisu M., Rinanto N., and Su C.-L., Eds. Singapore: Springer, 2025, pp. 127–183, doi: [10.1007/978-981-96-4438-4_6](https://doi.org/10.1007/978-981-96-4438-4_6)
- [8] IEC, IEC 62443 Series: Security for Industrial Automation and Control Systems. Geneva, Switzerland: IEC.
- [9] Drougkas A., Sarri A., Kyranoudi P., and Zisi A., *Port Cybersecurity: Good Practices for Cybersecurity in the Maritime Sector*, Tech. Rep. Heraklion, Greece: European Union Agency for Cybersecurity (ENISA),

REFERENCES

- [1] Knatz G., Notteboom T., and Pallis A. A., "Container terminal automation: revealing distinctive terminal characteristics and operating parameters," *Maritime Economics & Logistics*, vol. 24, no. 3, pp. 537–565, 2022, doi: [10.1057/s41278-022-00240-y](https://doi.org/10.1057/s41278-022-00240-y)
- [2] Notteboom T., Pallis A., and Rodrigue J.-P., *Port Economics, Management and Policy*. New York, NY, USA: Routledge, 2022, doi: [10.4324/9780429318184](https://doi.org/10.4324/9780429318184)
- [3] Majoral G., Reyes A., and Saurí S., "Lessons from reality on automated container terminals: What can be expected

2019. [Online]. Available: <https://www.enisa.europa.eu/publications/port-cybersecurity-good-practices-for-cybersecurity-in-the-maritime-sector>. Accessed: Jul. 7, 2020.
- [10] Wasilewski W., Wolak K., and Zaráś M., "Autonomous shipping. The future of the maritime industry?," *Zeszyty Naukowe Małopolskiej Wyższej Szkoły Ekonomicznej w Tarnowie*, vol. 51, no. 3, pp. 155–163, Sep. 2021, doi: <https://doi.org/10.25944/znmwse.2021.03.155163>
- [11] International Transport Forum (ITF), *The Economic and Social Impact of Automation in Ports*, ITF Research Report. Paris, France: OECD Publishing, 2019.
- [12] Danuser Y. and Kendzia M. J., "Technological advances and the changing nature of work: Deriving a future skills set," *Advances in Applied Sociology*, vol. 9, no. 10, pp. 463–477, 2019, doi: [10.4236/aasoci.2019.910034](https://doi.org/10.4236/aasoci.2019.910034)
- [13] Drewry Maritime Research, *Capital Expenditure Benchmarking in Automated Container Terminals*, Research Report. London, U.K.: Drewry Publishing, 2022.
- [14] P. W. de Langen, R. van den Berg, and A. Willeumier, "A new approach to granting terminal concessions: the case of the Rotterdam World Gateway terminal," *Maritime Policy & Management*, vol. 39, no. 1, pp. 79–90, 2012, DOI: [10.1080/03088839.2011.642311](https://doi.org/10.1080/03088839.2011.642311)
- [15] Kim B., Kim G., and Kang M., "Study on comparing the performance of fully automated container terminals during the COVID-19 pandemic," *Sustainability*, vol. 14, no. 15, Art. no. 9415, Aug. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/su14159415>
- [16] Rodrigue J.-P. and Notteboom T., "Automation in container port systems and management," *T.R. News*, no. 334, pp. 20–26, Jul.–Aug. 2021.
- [17] Sha M., Notteboom T., Zhang T., Zhou X., and Qin T., "Simulation model to determine ratios between quay, yard and intra-terminal transfer equipment in an integrated container handling system," *Journal of International Logistics and Trade*, vol. 19, no. 1, pp. 1–18, 2021.
- [18] Heilig L. and Voß S., "Inter-terminal transportation: an annotated bibliography and research agenda," *Flexible Services and Manufacturing Journal*, vol. 29, no. 1, pp. 35–63, 2017, doi: [10.1007/s10696-016-9237-7](https://doi.org/10.1007/s10696-016-9237-7)
- [19] Camarero Orive A., Parra Santiago J. I., Esteban-Infantes Corral M. M., and González-Cancelas N., "Strategic analysis of the automation of container port terminals through BOT (Business Observation Tool)," *Logistics*, vol. 4, no. 1, Art. no. 3, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/logistics4010003>
- [20] Ghiara H. H. and Tei A., "Port activity and technical efficiency: determinants and external factors," *Maritime Policy & Management*, vol. 48, no. 5, pp. 711–724, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.1080/03088839.2021.1872807>
- [21] Notteboom T. T., Pallis T., and Rodrigue J.-P., "Disruptions and resilience in global container shipping and ports: the COVID-19 pandemic versus the 2008–2009 financial crisis," *Maritime Economics & Logistics*, vol. 23, no. 2, pp. 179–210, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.1057/s41278-020-00180-5>
- [22] Castelein B., Geerlings H., and Van Duin R., "The reefer container market and academic research: A review study," *Journal of Cleaner Production*, vol. 256, Art. no. 120654, 2020, doi: [10.1016/j.jclepro.2020.120654](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120654)
- [23] Giuliano G. and O'Brien T., "Reducing port-related truck emissions: The terminal gate appointment system at the Ports of Los Angeles and Long Beach," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 12, no. 7, pp. 460–473, Oct. 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.06.004>

- [24] Li X., "Trends and prospects of port digital transformation," *Highlights in Business, Economics and Management*, 2024, doi: <https://doi.org/10.54097/fqpgy243>
- [25] Min H., "Developing a smart port architecture and essential elements in the era of Industry 4.0," *Maritime Economics & Logistics*, vol. 24, no. 2, pp. 189–207, Jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.1057/s41278-022-00211-3>
- [26] Li F. Y., Chang D., Gao Y., Zou Y., and Bao C., "Automated container terminal production operation and optimization via an AdaBoost-based digital twin framework," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2021, Art. no. 1936764, Sep. 2021, doi: <https://doi.org/10.1155/2021/1936764>
- [27] Kaptsov L., "RESTful API design for geospatial logistics platforms using TypeScript and Laravel," *Journal of Information, Technology and Policy*, 2025, doi: <https://doi.org/10.62836/jitp.2025.515>
- [28] Bershchanskyi Y., Klym H., and Shevchuk Y., "Containerized Artificial Intelligent System Design in Cloud and Cyber-Physical Systems," *Advances in Cyber-Physical Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 151–157, 2024, doi: <https://doi.org/10.23939/acsps2024.02.151>
- [29] Drozd A., "Intelligent systems for transport logistics optimisation: Algorithms, architecture, and legal aspects," in *Proc. Int. Conf. Economic Sciences and Management in the Changing World 2025 (ICESMCM 2025)*, no. 5, Nov. 2025, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17550734>
- [30] Sagin S., Kuropyatnyk O., and Tkachenko I., "Providing of the sea vessels ecological exploitation," in *Proc. V Int. Maritime Sci. Conf. MPP&O-2024*, Odesa, Ukraine, 2024, pp. 145–147.
- [31] Pechenyuk A. and Petrychenko O., "Prediction of safe maneuvers in restricted waters as problem of navigation and ship hydrodynamics," in *Transport Means – Proc. Int. Conf.*, vol. 25, 2021, pp. 239–244.
- [32] S. S. Sviridova and Yu. O. Zakharchenko, "Osnovni shliakhy ta rezervy potentsialu rozvytku morskyykh portiv Ukrainy," *Ekonomika: realii chasu*, no. 5(57), pp. 91–98, 2021, doi: [10.5281/zenodo.6075998](https://doi.org/10.5281/zenodo.6075998) [in Ukrainian]
- [33] Rusanova S. and Perepichko M., "Modeli upravlinnia morskymy portamy: sivitovi praktyky," *Ekonomika ta suspilstvo*, no. 61, p. 102, 2024, doi: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-61-102>.
- [34] S. Kramskiy, O. Darushin, and O. Zakharchenko, "Stalyi innovatsiinyi rozvytok morskyykh portiv u vymiri bezpekovykh zahroz i turbulentnosti," *Grail of Science*, no. 57, pp. 281–293, 2025, doi: [10.36074/grail-of-science.17.10.2025.026](https://doi.org/10.36074/grail-of-science.17.10.2025.026). [in Ukrainian].
- [35] Shevchuk Y., "Risk management and compliance strategies for legacy IT infrastructure," *The American Journal of Engineering and Technology*, vol. 7, no. 8, pp. 85–91, 2025, doi: <https://doi.org/10.37547/tajet/Volume07Issue08-10>
- [36] Kulishova O. O., Kotenko V. V., and Yakovtsev S. S., "Perspectives of introducing digital technologies into the operational safety management processes of seaports," *Tavryiskyi Naukovyi Visnyk. Seriya: Ekonomika*, no. 11, pp. 76–85, Jan. 2022, doi: <https://doi.org/10.32851/2708-0366/2022.11.11>
- [37] Vlasova V. and Yedemskyi Y., "Problems and perspectives of development of sea ports on the Danube," *Ekonomika i Upravlinnia*, no. 43–44, pp. 116–122, Dec. 2018. [Online]. Available: <https://journals.duit.edu.ua/index.php/economy/article/view/1000>
- [38] Khab O., "Analiz ekonomichnoho potentsialu morskyykh portiv Ukrainy v umovakh realizatsii innovatsiinykh mozhlyvostei," *Economic Analysis*, vol.

29, pp. 192–199, 2019, doi:
10.35774/econa2019.01.192

- [39] Vorkunova O., "Vykorystannia informatsiinykh tekhnolohii u diialnosti morskyykh portiv," *Development of Management and Entrepreneurship Methods on Transport (ONMU)*, 2024, doi: <https://doi.org/10.31375/2226-1915-2024-4-24-34>
- [40] Volkov O. M., Petrychenko O. O., and Vlasenko E. A., "Hazards of using autonomous vessels," *Sudovozhdenie*, no. 34, pp. 20–32, 2023.
- [41] Kyryllova O. V., Kyryllova V. Yu., and Mahamadov O. R., "Poniattia «Smart Port» u konteksti hlobalnykh tendentsii intehratsii intelektualnykh transportnykh ta informatsiinykh tekhnolohii u portovii industrii," *Vcheni zapysky TNU im. V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky*, vol. 35, no. 74, pp. 81–86, 2024, doi: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/14>
- [42] Muradian A. O. and Demydiukov O. V., "Truck equipment development prospects and features of its use in the conditions of automation of port terminals," *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, no. 208, pp. 207–214, 2024, doi: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.208.2024.308732>
- [43] Vernadat G. F. B., Molina A., Panetto H., and Weichhart G., "Interoperability Challenges in Collaborative and Automated Systems," in *Interoperability Principles and Standards: Applications to Collaborative and Automated Systems*. Cham, Switzerland: Springer, 2025, ch. 2, pp. 19–79, doi: 10.1007/978-3-031-81497-6_2