

ШЕЛЕХАНЬ Г. І., канд. техн. наук, доцент,
ПОГОРСЛОВ В. В., магістр
(Український державний університет залізничного транспорту)



Підвищення ефективності взаємодії об'єктів припортової станції та морського порту

Анотація. У статті проаналізовано сучасний стан і умови функціонування припортової вантажної станції з позиції ефективності її взаємодії з морським портом для обробки вагонопотоків з експортними вантажами. Виконано формалізацію процесу обробки експортних вагонопотоків на станції з урахуванням мінімуму часу простою вагонів в очікуванні технологічних операцій. Сформована математична модель дає змогу враховувати випадковість подавання місцевих вагонів з експортними вантажами у порт, оцінювати ефективність використання об'єктів станційної та портової інфраструктури, прогнозувати середній час простою місцевих вагонів.

Ключові слова: припортові станції, подавання вагонів, простій місцевих вагонів, експортні вагонопотоки.

Постановка проблеми.

У сучасному середовищі, для якого характерні економічна нестабільність та інтенсивна конкуренція у сфері транспортних послуг, особливої значущості набуває проблема підвищення рівня сервісу на залізничному транспорті. Реалізація концепції, орієнтованої на потреби споживача, охоплює весь комплекс операцій – від формування планів перевезень до практичного виконання транспортного процесу – і має забезпечувати раціональне використання наявних пропускних можливостей залізничної інфраструктури та виробничої потужності станцій. Такий підхід дає змогу ефективно задовольняти будь-які запити на вантажні перевезення із забезпеченням надійності, точності та зручності вантажовласників.

Проте на сьогодні є недостатньо узгодженою взаємодія між учасниками ринку вантажних перевезень: операторів рухомого складу, вантажовласників, перевізників, що призводить до порушення технології роботи вантажних станцій, особливо спеціалізованих з обслуговування місць незагального користування. На станціях накопичується значна кількість вагонів, які належать різним власникам, що ускладнює виконання місцевої роботи. При цьому знижується надійність вантажних станцій для виконання основних функцій: обслуговування клієнтів послуг залізничного транспорту з виконання операцій із приймання та відправлення поїздів, подавання та прибирання вагонів і завантаження-вивантаження вантажів відповідно до заявок клієнтів.

Обслуговування клієнтів залізничного транспорту здійснюється нерівномірно, а залізниці зазнають збитків через перевищення робочого парку вагонів і їхні непродуктивні простой на станціях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В умовах зростання глобальних ланцюгів постачання територією України та нарощування обсягів вантажоперевезень припортові залізничні станції часто стають «вузькими місцями», а ефективність їхньої взаємодії з морським транспортом набуває критичного значення для національної та світової економіки. Сучасні наукові праці, присвячені цій проблематиці, досліджують головні аспекти підвищення ефективності функціонування залізничної інфраструктури, включаючи новітні технологічні рішення, оптимізацію технічних і технологічних процесів, підвищення переробної спроможності та зменшення простоїв рухомого складу [1-4]. Дослідження демонструють комплексний підхід щодо розв'язання проблеми дисбалансу потужностей і операційної ефективності [5-7]. Значна частина наукової новизни зосереджена у сфері інтегрованого планування та застосування передових математичних методів і програмних рішень [8-9].

Так, автори роботи [10] навели новітній метод оптимізації розкладу та розподілу ресурсів на припортових залізничних станціях. Головний результат роботи – розроблення інтегрованої оптимізаційної моделі на основі змішаного цілочисельного лінійного програмування, рішення якої мінімізує сукупний час простою поїздів і порожній пробіг маневрових локомотивів. Для досягнення цього автори використали суміщену

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

архітектуру глибокого навчання з підкріпленням. Це дає змогу досягти вищої якості рішень порівняно з традиційними евристичними підходами, підвищуючи загальну експлуатаційну ефективність станції та зменшуючи простої рухомого складу.

У сегменті контейнерних перевезень група авторів [11] запропонувала процесно-центрований метод оцінювання доцільності впровадження системи «порт–сухий порт». На відміну від традиційного дистанційно-орієнтованого підходу, цей метод використовує реінжиніринг процесів із його економічним оцінюванням на основі погодинного функціонально-вартісного аналізу. Запропоноване рішення, яке передбачає консолідацію вантажів і перенесення митного оформлення до сухого порту, допомагає усунути перевантаження припортової інфраструктури через повторні операції та суттєво скоротити час простою вагонів.

У наукових працях [12, 13] зазначено, що головною перспективою узгодженої роботи станцій є диджиталізація в організації мультимодальних перевезень. Це потребує створення інтегрованого інформаційного простору між усіма учасниками транспортно-логістичного процесу. Проведений критичний аналіз наукових джерел дав змогу виявити нерозв'язану частину проблеми, яка полягає у визначенні інноваційних концепцій диджиталізації для учасників транспортного ринку.

У дослідженні [14] зазначено, що існує значна прогалина в науковій літературі щодо мультимодальних транспортних мереж на основі сухих портів. У роботі розроблено модель змішаного цілочисельного нелінійного програмування, яка інтегрує планування відправлення та попиту вантажів, управління запасами та відставання, урахуваючи доступність видів транспорту в кожному вузлі. Щоб врахувати перебої внаслідок невизначених подій, таких як екстремальні погодні умови, цю модель розширено до двоетапної стохастичної моделі програмування. Стохастична модель урахує невизначеність у доступності видів транспорту, що дає змогу використовувати проактивні та адаптивні стратегії.

Головна проблема, що домінує в дослідженнях, – низька ефективність взаємодії залізничної та портової ланок, яка проявляється в перевантаженні припортових станцій, значних простоях рухомого складу та незгодженості переробних потужностей станцій і портів. Зокрема, в Україні ця проблема загострена через недостатню ємність колійного розвитку та неефективність маневрових засобів. У контейнерних перевезеннях додаткові труднощі створює складність митних і внутрішньопортових процедур, що призводить до непродуктивного перевантаження.

При цьому в публікаціях сумісну роботу вантажних станцій і місць незагального користування розглядають із позицій максимальної вантажно-вивантажувальної спроможності на вантажних пунктах. У сучасних умовах необхідно враховувати можливості інфраструктури обробляти зростаючі обсяги вантажо- та вагонопотоків, причому з випадковим характером надходження вагонів на станції та обробки їх на вантажних пунктах.

Усувають ці проблеми впровадженням інноваційних технологічних та організаційних рішень. До основних методів належать: 1) реінжиніринг процесів із впровадженням концепції «сухий порт» для консолідації вантажів і винесення митних процедур; 2) застосування методів штучного інтелекту для інтегрованого та динамічного планування маневрових операцій і розподілу ресурсів, що є значним кроком вперед від традиційного планування; 3) імітаційне моделювання для оцінювання переробної спроможності та надійності станцій в умовах стохастичного надходження вагонів, що є критичним для раціонального використання станційної інфраструктури; 4) модернізація інфраструктури та залучення інвестицій через механізми державно-приватного партнерства для подолання дисбалансу потужностей.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.

Незважаючи на значні успіхи світових наукових досліджень, нерозв'язаними проблемами залишається пошук ефективних форм взаємодії вантажних припортових станцій із морськими портами, збільшення обсягів перевалки вантажів на принципах раціональної організації станційних транспортно-технологічних процесів.

Також актуальним усе ще є подолання законодавчих і регуляторних бар'єрів для повноцінного функціонування та взаємодії різних видів транспорту, практична імплементація розроблених систем підтримки ухвалення рішень, їх інтеграція з існуючими диспетчерськими системами, оптимізація обробки вантажопотоків в умовах фізичних обмежень і зносу станційної інфраструктури. Перспективи подальших досліджень мають включати розроблення методології оцінювання інвестиційних проєктів у припортову інфраструктуру з акцентом на розвиток інтегрованих цифрових платформ для досягнення максимальної узгодженої роботи порту і станції з передавання вагонів.

Формулювання мети.

Метою роботи є підвищення ефективності взаємодії об'єктів припортової станції та морського порту через урахування рівня використання об'єктів

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

станції та порту для обробки вагонів з експортними вантажами.

повільною перебудовою логістики та переорієнтацією частини вантажів на альтернативні (автомобільні та річкові) маршрути.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Динаміка експортних залізничних перевезень за останні п'ять років (рис. 1) демонструє значні коливання, які відображають вплив глобальних і внутрішніх кризових явищ. Період до 2022 року – це відносна стабільність обсягів, із незначними коливаннями, пов'язаними з пандемією COVID-19 і світовою кон'юнктурою цін на сировинні товари (залізна руда, зерно).

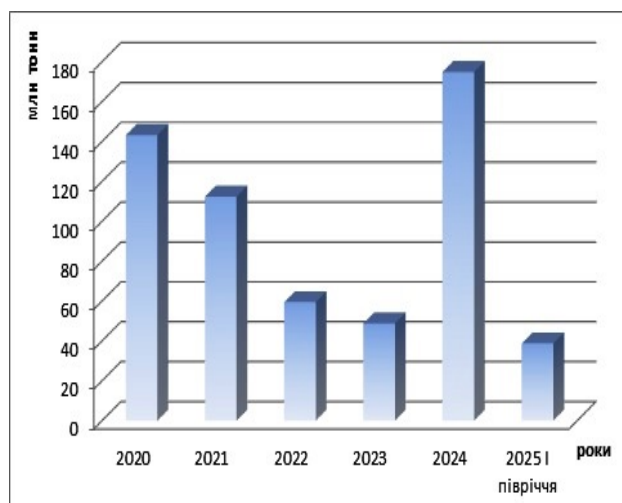


Рис. 1. Динаміка експорту вантажів залізницею

24 лютого 2022 року стало переломним моментом. Обсяги перевезень різко скоротилися внаслідок руйнування інфраструктури, окупації територій, блокування основних морських шляхів і загальної мобілізації економіки. У 2022 році АТ «Укрзалізниця» була змушена виконувати невластиві їй функції – евакуаційні заходи, забезпечення внутрішніх військових і гуманітарних потреб, що позначилося на ефективності вантажних операцій. У 2023 році через адаптацію логістики спостерігали подальше зменшення експортних перевезень залізницею, яке, за офіційними даними, склало близько 5,8 % порівняно з попереднім роком, попри часткову стабілізацію ситуації. Це було пов'язано з

У 2024 і прогнозованому 2025 роках завдяки налагодженню роботи «зернового коридору» та адаптації до нових реалій спостерігали часткове відновлення обсягів. Частка експорту в загальній структурі залізничних перевезень зросла до критичних значень, підкреслюючи їхню незамінність. Проте загальний тоннаж експортних вантажів залишається суттєво нижчим за довоєнний рівень, а ефективність логістики – нижчою через численні нерозв'язані проблеми.

На сьогодні у зв'язку із цифровізацією та інтелектуалізацією транспортно-технологічних процесів наука і практика моделювання залізничних станцій і вузлів переживає новий етап розвитку на принципах формування цифрових моделей транспортних об'єктів.

Для забезпечення конкурентоспроможності залізниці необхідні достатні резерви пропускної спроможності як залізничних дільниць, так і станцій.

Нерівномірність надходження вагонопотоків на припортові залізничні станції (рис. 2) має яскраво виражений імовірнісний характер, що зумовлено великою кількістю факторів, включаючи нерівномірність надання вантажів до перевезень і оснащення вантажних фронтів. Ці коливання потужності вагонопотоків мають значний вплив на технологічні процеси станцій, зокрема параметр накопичення вагонів на сортувальних станціях, нераціональне використання станційної інфраструктури припортових станцій, що може призводити до значних простоїв як вагонів, так і локомотивів. У результаті виникає дисбаланс між пропускною спроможністю припортових станцій і переробною спроможністю портів, що збільшує транспортні витрати та знижує загальну ефективність взаємодії залізничного й морського транспорту. Для забезпечення ритмічності роботи і зменшення негативних наслідків важливим є застосування методів моделювання та оперативного планування, які враховують стохастичність цих процесів.

місяці роки	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2024	814,78	798,15	1006,00	1115,75	1249,77	1381,80	1547,99	1779,21	1995,37	2012,00	1978,75	948,55
2023	741,76	809,19	1003,06	1131,18	1216,49	1350,34	1552,55	1803,83	2039,84	2039,84	2006,12	1163,97
2022	1006,08	869,82	1129,27	1271,13	1328,25	1569,78	1741,41	1860,96	2127,88	2258,54	2109,22	1393,30
2021	748,25	719,83	955,04	1059,23	1233,82	1311,80	1469,58	1720,65	1957,44	1910,08	1878,51	821,57
2020	682,26	844,95	988,40	1173,83	1227,36	1453,73	1576,10	1871,84	2099,25	2116,75	2081,76	1377,55
2019	873,96	911,95	1149,44	1274,84	1313,97	1388,83	1768,72	2032,90	2279,89	2298,89	2450,88	1254,79

Рис. 2. Хромакарта перевалки вантажів із залізничного на морський вид транспорту в Одеському морському торговельному порту, тис. т

Як видно з хроматичної карти обсягів перевалки, спостерігають суттєву нерівномірність в обсягах роботи морських портів з експортування вантажів за місяцями року. Зменшення вантажообігу України пов'язане зі скороченням сільгоспугідь і спадом виробництва в експортно орієнтованих галузях, зокрема металургії, яка до війни забезпечувала експорт до 80 % продукції. Також це пов'язано зі спеціалізацією портів за номенклатурою вантажів, що зумовлює появу фактора сезонності в обсягах надходжень. Так, морські порти, значну частину перевалки яких складають зернові вантажі та рослинні жири й олії, мають найбільше завантаження в період збору врожаю і до кінця року, а в портах, спеціалізованих за несезонними вантажами, спостерігають більш рівномірні обсяги експортування протягом року. На глобальному рівні перевалка вантажів знижується через нестабільність ринків і порушення маршрутів логістики.

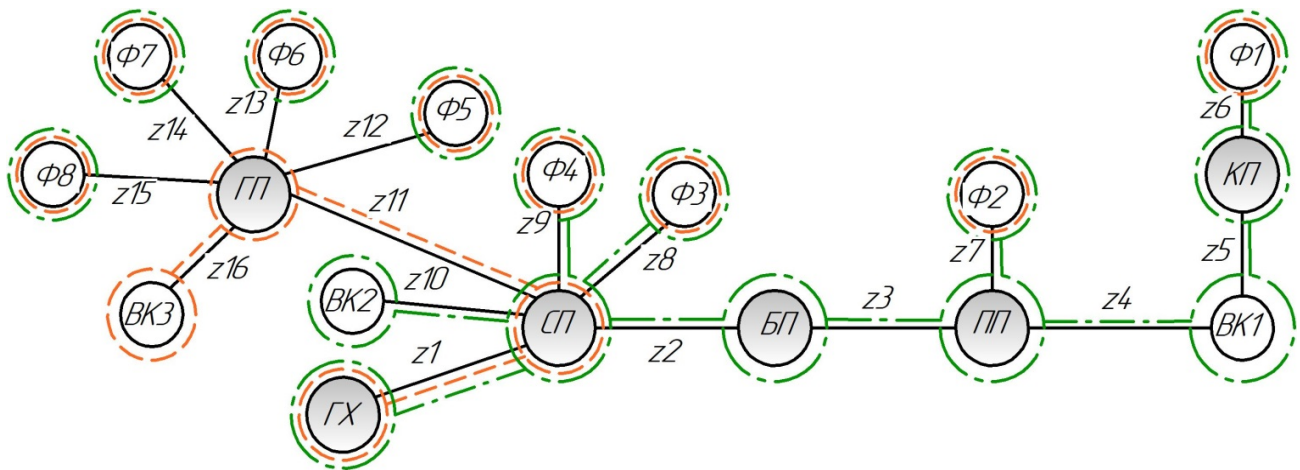


Рис. 3. Схема-граф технологічних переміщень по припортовій вантажній станції та порту

Об'єктами припортової станції та порту прийнято головні колії примикання (ГХ), станційні парки (СП, БП, ПП, КП), витяжні колії (ВК1, ВК2, ВК3), вантажні фронти причалів порту, на які подають вагони зі станції (Фі), та інші колії (з'єднувальні, виставочні тощо) – зі.

Розглянемо варіанти переміщень вагонів згідно з технологією обробки після прибуття вантажних поїздів різних категорій з експортними вантажами. Для цього виділимо основні технологічні операції, які мають вагоме значення для розв'язання сформованої задачі.

Варіант технологічних переміщень вантажного маршруту (зелена штрих-пунктирна лінія) передбачає, що вантажний поїзд прибуває з перегону по головній колії, ГХ, і буде прийнятий до парку СП. Після обробки вагони розвозять для розвантаження-навантаження на вантажні фронти причалів порту, Фі, і назад. Цією технологічною лінією вагонопотік

Продес перевезення у структурі діяльності припортових вантажних станцій функціонально можна подати як взаємодію станції примикання і місць незагального користування (рис. 3). Описати роботу станції в цілому можна найбільш повно лише у випадку, якщо відомі залежності, що пов'язують окремі елементи системи з початковими умовами, параметрами та змінними. Але не завжди при цьому за допомогою аналітичних формул можна визначити параметри роботи підприємства, оскільки багато з них задані ймовірно й непрогнозовано. Використовуючи математичне моделювання, можна відтворити процес роботи станції примикання та вантажного об'єкта так, що всі елементарні операції виконуватимуться зі збереженням послідовності та часу.

прямує зі станції у порт і назад без додаткових технологічних операцій.

Варіант технологічних переміщень передавального поїзда, що надійшов із суміжної технічної станції (помаранчева пунктирна лінія), передбачає обробку і подальше розформування. У цьому випадку після приймання поїзда в парк СП і проведення технологічних операцій після прибуття состав переставляють у парк ПП, що використовують як сортувальний. Після закінчення розформування проводиться формування подач вагонів на вантажні фронти причалів і їх подальше подавання. При цьому, урахувавши колійний розвиток станції та призначення вагонів, можлива перестановка подач маневровим локомотивом у парку БП, ПП, або КП, через які подачі будуть направлені на відповідні причали.

У таблиці наведено показники використання об'єктів зі схеми-графа. За результатами можна

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

зробити висновок, що найбільш невизначеними в організації технологічного процесу станції об'єктами, а отже, її «вузьким місцем», виявилися витяжні колії, на яких здійснюють операції з перестановки составів поїздів і маневрових передач. Цей результат є очікуваним, урахувавши відсутність гіркового сортувального пристрою на станції та нераціональну

конструкцію горловин станції через її значну протяжність уздовж берегової лінії.

Таблиця

Показники використання об'єктів станції та порту

Інфраструктурний елемент	ГХ	СП	ГП	БП	ПП	КП	ВК1	ВК2	ВК3	Ф1	Ф2	Ф3	Ф4	Ф5	Ф6	Ф7	Ф8
Імовірність завантаження елемента	0,31	0,86	0,91	0,65	0,69	0,45	0,33	0,40	0,85	0,03	0,12	0,27	0,08	0,06	0,20	0,40	0,53
Резерв вільності елемента, %	69	14	9	35	31	55	67	60	15	97	88	73	92	94	80	60	47
Ентропія елемента	0,36	0,13	0,09	0,28	0,26	0,36	0,37	0,37	0,14	0,11	0,25	0,35	0,20	0,17	0,32	0,37	0,34
Відносна організація елемента	0,67	0,87	0,91	0,72	0,74	0,64	0,63	0,63	0,86	0,89	0,75	0,65	0,80	0,83	0,68	0,63	0,66

Як оцінку ефективності взаємодії об'єктів припортової станції та порту прийнято часову параметризацію станційних технологічних процесів під час обробки експортних вагонопотоків.

На сформованій схемі-графі станції з m елементів інфраструктури виділено n технологічних операцій з обробки вагонів. Позначимо через $A_{mn} = \{t_{mn} | \gamma_A(t_{mn})\}$ технологію роботи об'єктів станції й порту і їх тривалість зайняття. При цьому γ_A – частка належності t_{mn} у A_{mn} .

Усі вагони, що прибувають на станцію, мають бути перероблені в системі без наднормативних простоїв і відставлення від руху, тоді буде виконана нерівність

$$\sum_{i=1}^p V_i \leq \sum_{j=1}^q b_j, \quad (1)$$

де V_i – кількість вагонів, що прибувають на станцію за одиницю часу;

b_j – кількість вагонів, які станція може переробити за одиницю часу за умови максимального забезпечення технічних потужностей і мінімального простою на об'єктах станції та порту.

Нехай x_{ij} – це кількість вагонів за варіантом організації технологічних процесів, які можуть бути спрямовані з об'єкта станції на об'єкт порту (вантажний фронт) у множині допустимих варіантів за таких умов:

а) усі заплановані до подавання у порт вагони з експортними вантажами мають бути організовані та виконані;

б) сумарна кількість переданих у порт вагонів не має бути більше, ніж та, що може бути перероблена.

Множина варіантів взаємодії об'єктів припортової станції та порту, що забезпечують раціональний варіант організації технологічних процесів, має включати набір послідовності використання об'єктів станції для кожного варіанта технологічних маршрутів із визначеною кількістю вагонів і тривалістю зайняття елементів, забезпечуючи загальний мінімум часу простою вагонів.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Отже, із позиції сформованої задачі дослідження, цільова функція мінімізації тривалості простою вагонів з експортними вантажами, T , набуває вигляду

$$T = f(x_{ij}) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{m=1}^v \sum_{n=1}^w \{t_{ij}, x_{ij}, A_{mn} | \gamma_A(s_m)\} \rightarrow \min, \quad (2)$$

де t_{ij} – тривалість зайняття j -го об'єкта станції з виконанням на ньому i -ї технологічної операції серед n можливих з обслуговування вагонів з експортними вантажами, год;

x_{ij} – кількість вагонів, що обробляють на j -му об'єкті з виконанням i -ї технологічної операції;

A_{mn} – множина варіантів виконання технологічної роботи з обслуговування вагонів на m об'єктах;

$\gamma_A(s_m)$ – частка використання технологічного елемента s_m на схемі у послідовності блоків управління вибраної підмножини варіантів A_{ij} .

Множина можливих технологічних операцій з обслуговування вагонопотоку на припортовій станції, A_{mn} , включає набір послідовностей елементів схеми-графа для кожного варіанта, визначену кількість вагонів і тривалість зайняття елементів з урахуванням рішення про їх застосування за загального мінімуму простою вагонів.

Параметром керування є кількість вагонів, x_{ij} , що буде обслужена на кожному об'єкті станції і порту з виконанням технологічних операцій. Обмеження, що накладені на розв'язання задачі:

1) увесь вагонопотік, що надходить на станцію за розрахунковий період, має бути обслужений:

$$\sum_{i=1}^p x_i = V, \quad (3)$$

де V – кількість вагонів з експортними вантажами, що надходить на станцію за розрахунковий період;

2) кількість вагонів, що обслуговують, не має перевищувати їхню технічну можливість за розрахункову одиницю часу:

$$x_i \leq b_i; \quad (4)$$

3) тривалість обслуговування вагонів на кожному об'єкті не має перевищувати допустимих технологічних норм:

$$t_{ij} \leq t_{ij}^{\max}; \quad (5)$$

4) цілочисельність параметра керування x_{ij} , зважаючи на його сутність,

$$x_{ij} \in Z, \quad (6)$$

де Z – множина натуральних чисел.

Отже, математична модель за критерієм мінімізації простою вагонів з експортними вантажами на припортовій вантажній станції має систему обмежень

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m x_i = V; \\ x_i \leq b_i; \\ t_{ij} \leq t_{ij}^{\max}; \\ x_i \in Z. \end{cases} \quad (7)$$

Розв'язком поставленої оптимізаційної задачі є той варіант виконання технологічного процесу, за якого сумарний час зайняття всіх об'єктів станції не перевищує тривалість усіх можливих варіантів технологічних ліній із забезпеченням обробки всього обсягу вагонопотоків, що надходить.

Наведемо вирази для розрахунку тривалості обслуговування вагонопотоків на об'єктах станції. Загальний простій вагонів з експортними вантажами на припортовій станції, T , складається з таких елементів:

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

$$T = t_{np} + t_{nep} + t_{p-\phi} + t_{nod}, \quad (8)$$

де t_{np} – тривалість проведення технологічних операцій із приймання поїзда, год;

t_{nep} – час на перестановку состава з колій приймання на сортувальні колії станції, год;

$t_{p-\phi}$ – тривалість розформування состава і формування подач вагонів на вантажні fronti, год;

t_{nod} – час на подавання-забирання вагонів на вантажні fronti причалів, год.

Тривалість проведення технологічних операцій із приймання поїзда в загальному вигляді включає час на приймання поїзда, закріплення состава, отримання пакета поїзних документів, забирання локомотива, огороження колії, а також проведення технічного та комерційного огляду на приймально-відправній колії.

За технологією роботи станції, за відсутності гіркового сортувального пристрою розформування составів здійснюють на витяжних коліях, що примикають до сортувального парку ГП. Час на перестановку состава з колії приймання на сортувальні колії парку ГП для подальшого проведення на них розформування визначають, розраховуючи тривалість маневрових напіврейсів з урахуванням колійного розвитку станції та приведених уклонів.

Час на подавання-забирання груп вагонів на вантажні fronti причалів залежить від кількості вантажних фронтів, кількості подач на адресу цих фронтів, величини самих подач і розташування вантажних фронтів відносно сортувального парку. Визначаючи цю величину, доцільно врахувати те, що тривалість напіврейсів у такому випадку має

враховувати час на розгін-уповільнення і простій через ворожість маршрутів по станції. Для технологічного нормування застосовують формулу

$$t_{nod} = \frac{(\alpha_{py} + \beta_{py} \cdot n) \cdot v_m}{2} + \frac{0,06 \cdot L_{nep}}{v_m}, \quad (9)$$

де α_{py} – коефіцієнт, що враховує зміну швидкості руху локомотива на 1 км/год із розгоном та уповільненням руху;

β_{py} – коефіцієнт урахування додаткового часу на зміну швидкості руху кожного вагона в маневровому составі на 1 км/год із розгоном та уповільненням руху;

v_m – допустима швидкість руху маневрового состава, км/год;

L_{nep} – довжина перестановки, м.

Для визначення часу на подавання груп вагонів на вантажні fronti причалів і виявлення ступеня впливу на цю величину кількісних показників роботи припортової станції було проведено статистичне моделювання.

У результаті з достовірністю апроксимації близько 93 % було отримано лінійну залежність цієї величини від параметра керування – кількості вагонів, що подають на вантажні fronti причалів з об'єктів станції – паркових колій. Отже, у цільову функцію включений фактор впливу, який має стохастичний зв'язок між значеннями результативної та факторної ознак. На рис. 4 подана графічна інтерпретація результатів моделювання.

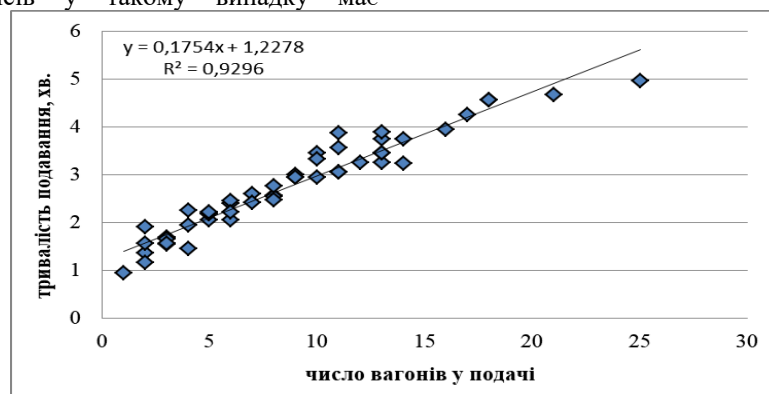


Рис. 4. Результати статистичного моделювання процесу подавання вагонів на вантажні fronti причалів

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Формалізована задача мінімізації простою вагонів з експортними вантажами на припортовій станції належить до задачі динамічного програмування з системою лінійних обмежень. Реалізовано моделювання у програмному середовищі Python.

Для кожної комбінації кількості вагонів на коліях і вантажних фронтах обчислювали:

- середній час простою вагонів T_{idle} ;
- стандартне відхилення часу простою $\sigma_{T_{idle}}$;
- довірчий інтервал 95 % для середнього часу простою.

Наведемо отримані результати у вигляді графічної залежності середнього простою вагонів на припортовій станції від кількості вагонів, що знаходяться на станційних коліях і вантажних фронтах (рис. 5).

Отримано залежність середнього часу простою від кількості вагонів на коліях і вантажних фронтах. Збільшення кількості вагонів на коліях у певному діапазоні призводить до зростання часу простою через обмеженість обробної потужності. Зменшення кількості вагонів нижче оптимального рівня знижує ефективність використання інфраструктури, а перевищення оптимальної кількості призводить до заторів і тривалого простою.

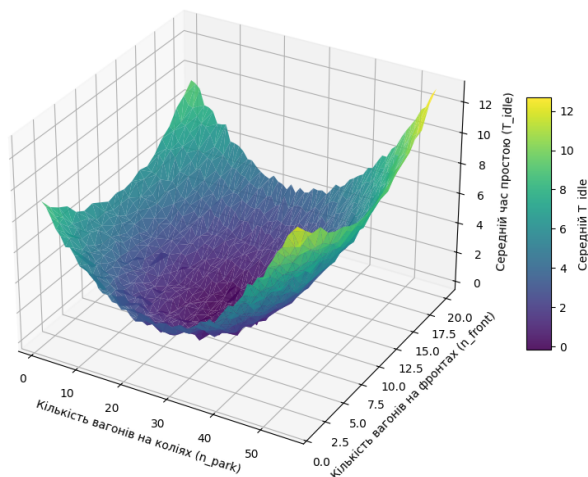


Рис. 5. Графічна інтерпретація результатів математичного моделювання

У результаті роботи програми отримано більше 50 варіантів значень загального простою за варіантом обробки вагонів, що надійшли маршрутами. Мінімальний час загального простою вагонів з експортними вантажами на станції склав 27,7 год. Програма дає змогу враховувати стохастичні фактори, що мають вплив на тривалість простоїв вагонів на станції.

Для кожної комбінації кількості вагонів було обчислено довірчі інтервали 95 % для середнього часу простою. Довірчі інтервали підтвердили стійкість середніх значень, оскільки більшість значень часу простою не виходила за межі ± 10 % середнього за кількості реплікацій 300. Це свідчить, що модель досить надійно відображає реальні процеси обробки вагонів на припортових станціях і допомагає визначити оптимальні параметри завантаження інфраструктури.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень.

Застосування сформованої математичної моделі на практиці дасть змогу скоротити непродуктивні простої вагонів з експортними вантажами в місцях стикування залізничного і морського видів транспорту, зменшити завантаження інфраструктурних елементів припортових станцій за рахунок раціонального розподілу вагонів із виконанням технологічних операцій і, як наслідок, збільшити їхню пропускну та переробну спроможність. Універсальність моделі полягає в можливості застосування її з використання елементів схеми-графа станції для організації роботи припортових станцій і формування послідовності управлінських рішень для конкретних станцій та умов експлуатації.

Практичне значення отриманих результатів:

- планування подавання вагонів на станції для зменшення їхніх простоїв;
- розроблення алгоритмів управління чергою вагонів на фронтах причалів;
- ухвалення рішень про оптимальну кількість вагонів на коліях для ефективної роботи причалів.

Отже, розроблена стохастична математична модель описує процес обробки експортних вагонів на припортових станціях. Модель дає змогу прогнозувати середній час простою вагонів за різних варіантів подавання вагонів на вантажні fronti і на коліях станції, урахувати випадковість подавання вагонів, оцінювати ефективність станційної інфраструктури і прогнозувати середній час простою. Результати моделювання можна використовувати для прогнозування та оптимізації логістичних процесів на припортових станціях, зменшення завантаженості пристроїв і підвищення переробної спроможності безгіркових станцій.

Список використаних джерел

1. Gao P., Zheng W., Liu J., Wu D. Identification of Critical Track Sections in a Railway Station Using a Multiplex Networks Approach. *Mathematics*. 2025. 13. 1151. <https://doi.org/10.3390/math13071151>.
2. Wang C., Xia Y., Zhu L. A Method for Identifying the Important Node in Multi-Layer Logistic Networks. *Front. Phys.* 2022. 10. 968645. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.968645>.
3. Baulina H., Bohomazova H., Prodashchuk S. Technological proposal for the attention of the risk in the management of the work of a railway station with a port. *Revista de la Universidad del Zulia*. 2023. 14. 400-414. <https://doi.org/10.46925/rdluz.39.22>.
4. Kurnia G., Adzkie H., Rachmawati N. Dry Port Location Selection: A Case Study of Tanjung Intan Port. *Journal of Emerging Supply Chain, Clean Energy, and Process Engineering*. 2023. 2. 45-58. <https://doi.org/10.57102/jescee.v2i1.53>.
5. Kobulov J., Shermatov E., Saidivaliev Sh., Sattorov S., Barotov J. Overdue waiting of wagons on railway branch tracks: problems and solutions. *E3S Web of Conferences*. 2024. 515. 03008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451503008>.
6. Xusanov S., Qobulov J., Samikova D. The sorting hump is a «drawing-analytical» method in finding the coordinates of the elements of the Strait. *E3S Web of Conferences*. 2023. 431. 05001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343105001>.
7. Gryshchuk O., Petryk A., Kopiak N., Litus T. Transport and logistics service of foreign trade cargo flows in integrated production systems. *MATEC Web of Conferences*. 2024. 390. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439003002>.
8. Kavička A., Krýže P. Dynamic Automated Search of Shunting Routes Within Mesoscopic Rail-Traffic Simulators. *J. Adv. Transp.* 2021. 8840516. <https://doi.org/10.1155/2021/8840516>.
9. Jarašūnienė A., Savickė E. Application of Quality Criteria in the Development of Partial Load Transportation. 2022. https://doi.org/10.1051/10.1007/978-3-030-94774-3_50.
10. Wu Y., He S., Long Z., Tang H. Integrated Operations Scheduling and Resource Allocation at Heavy Haul Railway Port Stations: A Collaborative Dual-Agent Actor-Critic Reinforcement Learning Framework. *Systems*. 2025. 13. 762. <https://doi.org/10.3390/systems13090762>.
11. Caballini C., Ghiara H., Gommellini G. From a Distance to a Process Perspective: A Method For Assessing the Feasibility of a Port-Dry Port System. *Applied Sciences*. 2025. 15(21):11715. <https://doi.org/10.3390/app152111715>.
12. Zapara Ya., Nechyporuk A., Kotova M., Mazhnyk L., Panchenko V., Vasylenko I. Innovative concepts of digitisation and digitalisation in the multimodal transportation organisation. *E3S Web of Conferences*. 621. 03014 (2025). ICGEST 2024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202562103014>.
13. Attaran M. Digital technology enablers and their implications for supply chain management. *Supply Chain Forum: An International Journal*. 2020. 21. <https://doi.org/10.1080/16258312.2020.1751568>.
14. Zhang X., Guo G., Irawan C.A., Chan H.K., Zeng F., Gu X. Tactical and operational planning of resilient multimodal dry port transportation network. *Industrial Management & Data Systems*. 2025. P. 1-31. <https://doi.org/10.1108/IMDS-01-2025-0096>.

References

- Gao, P., Zheng, W., Liu, J., & Wu, D. (2025).** Identification of critical track sections in a railway station using a multiplex networks approach. *Mathematics*, 13, Article 1151. <https://doi.org/10.3390/math13071151>
- Wang, C., Xia, Y., & Zhu, L. (2022).** A method for identifying the important node in multi-layer logistic networks. *Frontiers in Physics*, 10, Article 968645. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.968645>
- Baulina, H., Bohomazova, H., & Prodashchuk, S. (2023).** Technological proposal for the attention of the risk in the management of the work of a railway station with a port. *Revista de la Universidad del Zulia*, 14, 400-414. <https://doi.org/10.46925/rdluz.39.22>
- Kurnia, G., Adzkie, H., & Rachmawati, N. (2023).** Dry port location selection: A case study of Tanjung Intan port. *Journal of Emerging Supply Chain, Clean Energy, and Process Engineering*, 2, 45-58. <https://doi.org/10.57102/jescee.v2i1.53>
- Kobulov, J., Shermatov, E., Saidivaliev, S., Sattorov, S., & Barotov, J. (2024).** Overdue waiting of wagons on railway branch tracks: Problems and solutions. *E3S Web of Conferences*, 515, Article 03008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451503008>
- Xusanov, S., Qobulov, J., & Samikova, D. (2023).** The sorting hump is a «drawing-analytical» method in finding the coordinates of the elements of the strait. *E3S Web of Conferences*, 431, Article 05001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343105001>
- Gryshchuk, O., Petryk, A., Kopiak, N., & Litus, T. (2024).** Transport and logistics service of foreign trade cargo flows in integrated production systems. *MATEC Web of Conferences*, 390, Article

03002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439003002>
8. Kavička, A., & Krýže, P. (2021). Dynamic automated search of shunting routes within mesoscopic rail-traffic simulators. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, Article 8840516. <https://doi.org/10.1155/2021/8840516>
 9. Jarašūnienė, A., & Savickė, E. (2022). Application of quality criteria in the development of partial load transportation. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94774-3_50
 10. Wu, Y., He, S., Long, Z., & Tang, H. (2025). Integrated operations scheduling and resource allocation at heavy haul railway port stations: A collaborative dual-agent actor-critic reinforcement learning framework. *Systems*, 13, Article 762. <https://doi.org/10.3390/systems13090762>
 11. Caballini, C., Ghiara, H., & Gommellini, G. (2025). From a distance to a process perspective: A method for assessing the feasibility of a port-dry port system. *Applied Sciences*, 15(21), Article 11715. <https://doi.org/10.3390/app152111715>
 12. Zapara, Y., Nechyporuk, A., Kotova, M., Mazhnyk, L., Panchenko, V., & Vasylenko, I. (2025). Innovative concepts of digitisation and digitalisation in the multimodal transportation organisation. *E3S Web of Conferences*, 621, Article 03014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202562103014>
 13. Attaran, M. (2020). Digital technology enablers and their implications for supply chain management. *Supply Chain Forum: An International Journal*, 21. <https://doi.org/10.1080/16258312.2020.1751568>
 14. Zhang, X., Guo, G., Irawan, C. A., Chan, H. K., Zeng, F., & Gu, X. (2025). Tactical and operational planning of resilient multimodal dry port transportation network. *Industrial Management & Data Systems*, 1-31. <https://doi.org/10.1108/IMDS-01-2025-0096>
- implementation of innovative technological and organizational solutions. The process of handling export wagon flows at the station is formalized with consideration of minimizing wagon dwell time while awaiting technological operations. The developed mathematical model makes it possible to account for the stochastic nature of the delivery of local wagons with export cargoes to the port, evaluate the efficiency of using port station and port infrastructure facilities, and forecast the average dwell time of local wagons.*
- To determine the time required for delivering groups of wagons to the berth cargo fronts and to identify the extent to which quantitative performance indicators of the port-adjacent station influence this parameter, statistical modeling was carried out. A relationship has been obtained between the average dwell time and the number of wagons on the tracks and at the cargo fronts.*
- The practical significance of the obtained results lies in planning wagon delivery at the station to reduce dwell times, developing algorithms for managing wagon queues at berth fronts, and supporting decision-making regarding the optimal number of wagons on the tracks to ensure efficient operation of both the station and the port.*

Keywords: port stations, wagon delivery, local wagon dwell time, export wagon flows.

Шелехань Ганна Ігорівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6640-6084>. Тел.: +38 (066) 141-54-05. E-mail: shelekhan@kart.edu.ua.

Погорелов Віталій Вадимович, магістр, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (093) 313-93-10. E-mail: pogorelovv@kart.edu.ua.

Shelekhan Hanna Ihorivna, Cand. Tech. Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Railway Stations and Nodes, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0002-6640-6084>. Tel.: +38 (066) 141-54-05. Email: shelekhan@kart.edu.ua.

Pogorelov Vitalii Vadimovych, Magister student, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (093) 313-93-10. E-mail: pogorelovv@kart.edu.ua

Стаття надійшла 12.12.25

Стаття прийнята до друку після рецензування 18.01.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 27.04.26

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.

Hanna Shelekhan, Vitalii Pogorelov

ENHANCING THE EFFICIENCY OF INTERACTION BETWEEN PORT RAILWAY STATION AND THE SEAPORT

Abstract. *The article analyzes the current state and operating conditions of a port-adjacent freight station from the standpoint of the efficiency of its interaction with the seaport in processing wagon flows carrying export cargoes. The analysis of contemporary Ukrainian and world scientific and research studies devoted to this issue made it possible to identify the key aspects of improving the efficiency of railway infrastructure operation, including advanced technological solutions, optimization of technical and technological processes, enhancement of handling capacity, and reduction of rolling-stock dwell time. Existing problems are addressed through the*