

УДК 656.2

DOI: 10.18664/iksz.t.v28i3.290142

ПАРХОМЕНКО Л. О., к.т.н., доцент,
ПРОХОРОВ В. М., к.т.н., доцент,
КАЛАШНІКОВА Т. Ю., к.т.н., доцент,
ШАНДЕР О. Е., к.т.н., доцент
(Український державний університет залізничного транспорту)

Розроблення СППР для управління процесом формування контейнерних поїздів у рамках системи інтермодальних перевезень

На сучасному транспортному ринку інтермодальні контейнерні перевезення відіграють важливу роль, забезпечуючи ефективне транспортування вантажів як на міжнародному, так і внутрішньому рівні. У цьому контексті використання залізничного транспорту на сухопутних ділянках перевезення набуває все більшої значущості завдяки більшій вантажопідйомності, енергоефективності та екологічності.

Метою цього дослідження є удосконалення моделі управління процесами формування контейнерних поїздів і забезпечення їхньої своєчасної доставки на судно-контейнеровоз. Пропонується модель, що враховує особливості взаємодії різних учасників процесу разом із портовими терміналами, залізничними станціями та судновими операторами.

Дослідження виявило, що ефективне управління процесом формування контейнерних поїздів відіграє важливу роль у забезпеченні своєчасної доставки вантажів. Особливу увагу приділено ймовірнісним складовим моделі, пов'язаним із процесом накопичення контейнерів і їхнього просування до порту. Модель дає змогу ефективно оптимізувати моменти завершення формування поїздів з урахуванням низки обмежень.

Результати розрахунків і аналізу свідчать про недотримання оптимальних умов формування контейнерних поїздів, що з високою ймовірністю призведе до значних додаткових операційних витрат логістичних операторів в інтермодальних перевезеннях. Запропонована модель може слугувати основою для системи підтримки прийняття рішень (СППР) у сфері управління доставкою контейнерів до порту сухопутною частиною шляху під час використання контейнерних поїздів. Це дасть змогу підвищити надійність планування і покращити координацію процесів, забезпечуючи своєчасну доставку контейнерів на судно-контейнеровоз і підвищуючи ефективність інтермодальних перевезень.

Загалом використання розробленої математичної моделі сприятиме підвищенню операційної ефективності та забезпеченню високої якості послуг, що є значущим фактором для портових операторів, логістичних компаній та інших учасників логістичного ланцюга.

Ключові слова: інтермодальні контейнерні перевезення, контейнерний поїзд, випадковий потік, теорія точкових процесів.

Постановка проблеми

У сучасному світовому економічному контексті контейнерні перевезення відіграють вирішальну роль у глобальній логістиці, забезпечуючи ефективне і швидке доставлення вантажів по всьому світу. Обсяги контейнерних перевезень продовжують стрімко збільшуватися, відображуючи зростаючу потребу в

глобальній торгівлі та розширенні міжнародних торговельних зв'язків. За останніми даними, у 2020 році глобальні контейнерні перевезення склали понад 180 мільйонів TEU (Twenty-foot Equivalent Unit), що є рекордним значенням і свідчить про значущість цього сектору. У сучасному світі інтермодальні перевезення, що об'єднують різні види транспорту, стають дедалі більш затребуваними в контексті глобальної логістики.

У рамках таких перевезень особливого значення набуває ефективна взаємодія між залізничним і морським транспортом у процесі доставки контейнерів на судно-контейнеровоз. Оптимізація цієї взаємодії є необхідною умовою для забезпечення більш ефективних і надійних інтермодальних перевезень. Співпраця і координація між залізничними та морськими перевізниками, портовими операторами та логістичними компаніями стають ключовими факторами для успішної реалізації інтермодальних перевезень. Оптимізація планування і синхронізація графіків руху поїздів і суден, точне визначення часу навантаження і розвантаження контейнерів, а також ефективне використання інфраструктури портів і залізничних терміналів – усе це невід’ємна частина оптимізації процесу взаємодії між залізничним і морським транспортом.

У сучасних інтермодальних перевезеннях між континентами ефективна організація транспортування контейнерів від їхнього відправлення зі складів до фінальної доставки на судно-контейнеровоз є ключовим фактором для забезпечення своєчасного і надійного постачання вантажів. Оптимізація процесу формування контейнерних поїздів і їхнього просування в бік порту має велике значення для мінімізації часу зберігання і перебування контейнерів, а також підвищення операційної ефективності в ланцюжку поставок.

При створенні моделей управління та систем підтримки прийняття рішень для інтермодальних операторів слід звертати особливу увагу на взаємозв'язок між процесами надходження контейнерів на залізничну станцію і формування контейнерних поїздів. Раціональний підхід для створення таких моделей має базуватися на тому, що надходження контейнерів на станцію є випадковим потоком, який потребує врахування ймовірнісної природи процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Стаття [1] аналізує якість доступу до промислових районів за допомогою залізничного сполучення з трьома портовими кластерами (Роттердам, Дурбан і Lower Mississippi Port Cluster). Автори застосовують теоретичний фреймворк і опитувальні дані для оцінювання якості сполучення між портами та промисловими районами в глибині континентів, які вони обслуговують, виявляють суттєві відмінності між ними та обговорюють можливості поліпшення цього режиму. Незважаючи на це, стаття не уточнює конкретних параметрів якості доступу і не описує потенційні обмеження, що можуть вплинути на узагальнення результатів дослідження. У публікації [2] вирішується проблема операцій перевалки вантажів у

залізничних терміналах морських портів. Автори пропонують оптимізаційну модель та алгоритм для поліпшення ефективності перевалки контейнерів і зменшення часу зберігання. Позитивні сторони роботи – практичне застосування моделі та виявлення впливу пропускнуої спроможності вантажопідйомних кранів. Недоліком роботи є відсутність зазначення конкретних параметрів якості доступу та потенційних обмежень. Наступна стаття [3] досліджує проблему інтегрованого та ефективного транспорту в портовій зоні, пропонуючи оптимізаційну модель для переміщення контейнерів і транспортних засобів між терміналами. Робота визначає, що взаємопов'язаність терміналів і гнучкого графіка залізничних відправлень можуть поліпшити транспортну продуктивність. Позитивні сторони – використання реалістичного тестового випадку та практичної значущості для портових операторів. Однак недоліком роботи є відсутність конкретних результатів і врахування потенційних обмежень моделі. У наступній публікації [4] досліджується проблема оперативного планування залізничного транспорту в системі інтермодальних перевезень і пропонується використання стохастичної оптимізаційної моделі для підвищення ефективності транспортування контейнерів. Автори наголошують на важливості врахування ймовірнісної природи процесів формування та обробки контейнерних поїздів на станціях і пропонують автоматизовану технологію організації транспортування контейнерів. Недоліком роботи є обмежена інформація про застосовані методи й алгоритми та недостатній рівень розкриття механізмів, що обумовлюють ймовірнісний характер процесів формування контейнерних поїздів і надходження контейнерів до порту під час здійснення інтермодальних перевезень.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Як показав аналіз наукових публікацій останніх років, оптимізація використання залізничного транспорту при здійсненні інтермодальних контейнерних перевезень є актуальним завданням. Однак переважна більшість наукових досліджень, присвячених цій темі, зосереджені безпосередньо на процесі взаємодії між залізничним і морським транспортом, причому під оптимізацією взаємодії часто розуміються процеси, що відбуваються в припортових терміналах під час перевантаження контейнерів із залізничних вагонів. Дійсно, трансферні операції, тобто операції, при яких контейнеропотоки переходять від одного виду транспорту до іншого, є важливими. Їхня оптимізація є складним і важливим завданням, якісне вирішення якого дасть можливість позбутися багатьох проблем, таких як брак пропускнуої

спроможності терміналів, перевантаження транспортної інфраструктури припортових міст тощо. У деяких дослідженнях постає завдання узгодження режиму роботи терміналу з залізничним розкладом, і цей підхід також має раціональне зерно. Однак слід зазначити, що процес взаємодії залізничного і морського транспорту починається не в момент надходження поїзда до терміналу або його відправлення залізничною лінією в напрямку порту, а ще на стадії початку накопичення контейнерної партії для формування контейнерного поїзда. Отже, фактично від моменту надходження першого контейнера до залізничної термінальної станції до моменту відправлення з порту судна-контейнеровоза на цей процес впливає сукупність факторів, що і обумовлює його складну ймовірнісну природу.

Формулювання цілей

Метою дослідження є удосконалення моделі управління процесами формування контейнерних поїздів і подолання залізничної ділянки шляху для забезпечення своєчасної доставки контейнерів на судно під час здійснення інтермодальних перевезень.

Викладення основного матеріалу дослідження

Інтермодальні контейнерні перевезення пов'язані з необхідністю організації процесу просування вантажопотоків, які мають високу питому вартість порівняно з вантажами, що перевозяться залізницею у внутрішньому сполученні.

Використання залізничного транспорту в інтермодальних контейнерних перевезеннях обґрунтовано його перевагами, такими як висока вантажопідйомність, здатність перевозити великі обсяги вантажів та енергоефективність, особливо на далеких відстанях, і сприяє зниженню викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище.

Технологія накопичення контейнерних партій і формування контейнерних поїздів є важливим аспектом контейнерних перевезень. Вона передбачає координацію різних логістичних процесів, таких як завантаження, розвантаження і транспортування контейнерів, щоб забезпечити своєчасну і ефективну доставку контейнерів до кінцевого пункту призначення.

Однією з ключових проблем у цьому процесі є необхідність управління великою кількістю контейнерів, зазвичай задіяних в операціях з контейнерних перевезень. Щоб вирішити цю проблему, багато судноплавних компаній використовують спеціалізовані програмні системи, які дають змогу відстежувати місцезнаходження окремих контейнерів у режимі реального часу. Ці системи

також можуть бути використані для оптимізації маршрутів і планування контейнерних перевезень, що допомагає мінімізувати час транзиту і знизити транспортні витрати.

Ще одним важливим аспектом контейнерних перевезень є використання контейнерних поїздів для транспортування контейнерів з внутрішніх районів до порту. Контейнерні поїзди, як правило, складаються з серії з'єднаних між собою вагонів, спеціально призначених для перевезення контейнерів, часто використовуються для перевезення великих обсягів контейнерів на великі відстані і можуть бути ефективним і економічно вигідним способом переміщення товарів з внутрішніх районів країни в порт.

Крім контейнерних поїздів, багато судноплавних компаній також використовують вантажівки та інші види транспорту для переміщення контейнерів з внутрішніх районів до порту. Це може включати використання спеціалізованих контейнеровозів, призначених для перевезення одного або декількох контейнерів за раз. Такі вантажівки можна використовувати для перевезення контейнерів на коротші відстані, і вони можуть бути особливо корисними для операцій з доставки «останньої милі».

Загалом технологія накопичення контейнерних партій і формування контейнерних поїздів є складною і динамічною сферою, що потребує високого ступеня координації та планування. Використовуючи передові програмні системи і спеціалізоване транспортне обладнання, судноплавні компанії можуть оптимізувати свої операції і забезпечити своєчасну і ефективну доставку контейнерів до кінцевого пункту призначення.

Можливість відправлення неповних контейнерних поїздів є важливим моментом у логістиці контейнерних перевезень. Загалом судноплавні компанії прагнуть мінімізувати затримки в доставці контейнерів до порту, оскільки це може призвести до додаткових витрат і потенційних штрафів. Одним із підходів до досягнення цієї мети є відправлення неповних контейнерних поїздів, що дає змогу компанії своєчасно доставити контейнери в порт, не очікуючи, поки всі контейнери будуть зібрані.

Рішення про відправлення неповного контейнерного поїзда буде залежати від ряду факторів: об'ємів контейнерів, які необхідно перевезти, відстані до порту і наявності транспортних ресурсів. У деяких випадках може бути більш ефективним дочекатися, поки всі контейнери будуть зібрані, перш ніж відправляти поїзд, особливо якщо відстань до порту невелика, а транспортні ресурси легко доступні.

Однак у ситуаціях, коли час має вирішальне значення, а затримки можуть призвести до додаткових витрат, відправлення неповного контейнерного поїзда

може бути найбільш практичним рішенням. Такий підхід може допомогти забезпечити своєчасну доставку контейнерів у порт, навіть якщо не всі контейнери будуть зібрані на момент відправлення. У деяких випадках судноплавні компанії можуть також визначити пріоритетність певних контейнерів або вантажів, особливо чутливих до часу або цінних, щоб мінімізувати вплив затримок на свою діяльність.

Загалом доцільність відправлення неповних контейнерних поїздів буде залежати від конкретних обставин кожної транспортної операції. Хоча це може бути ефективною стратегією для мінімізації затримок і уникнення штрафів, проте не завжди найбільш практичний або ефективний підхід, особливо в ситуаціях, коли транспортні ресурси обмежені або відстань до порту значна. Зрештою, судноплавні компанії мають ретельно зважувати компроміси між витратами на затримку і транспортними витратами при прийнятті рішень про те, як збирати і транспортувати контейнерні поїзди.

Отже, основною номінальної складовою витрат у складі цільової функції є витрати, пов'язані з простоем контейнерів під накопиченням на термінальних станціях формування маршрутних контейнерних поїздів. Якщо функція залежності від часу кількості контейнерів, що надійшли на станцію, являє собою визначений інтеграл від функції інтенсивності, то функція залежності витрат контейнеродин від часу в процесі накопичення контейнерної партії може бути визначена як інтеграл від добутку функції інтенсивності та змінної часу:

$$B = \int_{\tau_0}^t \lambda^*(t) t dt, \quad (1)$$

де λ^* – функція умовної інтенсивності нестационарного випадкового потоку контейнерів, що надходять до залізничної термінальної станції;

τ_0 – момент часу початку розрахункового (планового) періоду;

t – час як змінна величина.

Отже, формула (1) містить інтеграл зі змінною верхньою границею.

Функція умовної інтенсивності є поняттям, застосовуваним у теорії випадкових процесів і статистиці та теорії точкових процесів. Нестационарність потоків надходження контейнерів до станції обумовлена сукупністю багатьох факторів: режимами роботи підприємств-вантажовідправників, ритмічністю роботи цих підприємств і їхніх транспортних відділів, наявністю автомобільного транспорту і водіїв для здійснення перевезення,

затрами на дорогах тощо. Під нестационарністю випадкових потоків розуміється зміна в часі їхніх характеристик, у першу чергу їхньої інтенсивності.

На відміну від звичайної функції інтенсивності, яка описує швидкість настання подій у заданій точці або інтервалі часу, функція умовної інтенсивності враховує передісторію та події, що відбуваються до заданого моменту часу. Вона визначає ймовірність настання події в зазначений момент часу або інтервал часу за умов певної передісторії та подій. Функція умовної інтенсивності надає інформацію про ймовірність настання події з урахуванням подій, що вже відбулися, і контексту, у якому вони відбуваються. Отже, у стаціонарного випадкового потоку інтенсивність є не лише бузумовною, а й взагалі сталою величиною.

Функція умовної інтенсивності в нестационарному випадковому потоці контейнерів, що надходять на термінальну залізничну станцію для формування контейнерного поїзда, являє собою міру інтенсивності надходження контейнерів у заданий момент часу або інтервал часу за умов певної передісторії та подій, що відбуваються на станції. Вона визначає ймовірність появи нового контейнера в зазначений момент часу або інтервал часу з урахуванням уже наявних контейнерів, які складають потяг, що формується, а також фактори, що впливають на процес накопичення і відправлення контейнерів. Функція умовної інтенсивності дає змогу оцінювати темпи надходження контейнерів на станцію з урахуванням динаміки формування поїзда і вплив зовнішніх факторів на цей процес.

За термінологією теорії точкових процесів (англ. theory of point processes), функція умовної інтенсивності – це функція залежності інтенсивності нестационарного випадкового процесу від часу, що враховує залежність імовірності настання наступних подій потоку від подій цього потоку в минулому, тобто ця функція безпосередньо залежить від історичних даних процесу, до того ж фактично є функцією ризику (англ. hazard function) [5]. Отже, з одного боку, часовий точковий процес (англ. temporal point process, TPP) – це розподіл імовірностей з послідовністю подій змінної довжини в безперервному часі. З іншого боку, часовий точковий процес можна розглядати як модель авторегресії. У той же час часовий точковий процес є також і лічильним процесом, тобто процесом підрахування кількості випадкових подій. Функція умовної інтенсивності дає змогу об'єднувати ці точки зору і моделювати точкові процеси, що мають різну природу та відповідну їй поведінку. Для вирішення цього завдання згідно з поставленою метою пропонується отримувати функції умовної інтенсивності шляхом генерації з використанням прогнозової моделі на основі нейронної мережі – так вона буде враховувати історичні дані.

Однак фактично функція умовної інтенсивності часового точкового процесу є тією самою функцією інтенсивності випадкового потоку, за термінологією теорії випадкових потоків, більш відомою в науковому та освітньому середовищі країн Східної Європи та СНД. Однак саме теорія точкових процесів є більш загальною і фактично єдиним стандартним і загальноприйнятим у науковому світі підходом, застосовуваним при дослідженні.

Першу складову експлуатаційних витрат можна записати як

$$C_1 = \sum_{i=1}^{N^{мер}} C_i^{к-хв} \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt, \quad (2)$$

де $N^{мер}$ – кількість термінальних станцій формування контейнерних поїздів;

$\lambda_i^*(t)$ – функція умовної інтенсивності нестационарного випадкового потоку надходження контейнерів до i -ї термінальної станції;

t_i – момент часу завершення процесу накопичення контейнерної партії на i -ї термінальній станції; $C_i^{к-хв}$ – вартість контейнеро-хвилини простою контейнера на i -ї термінальній станції, яка може включати як вартість хвилини використання контейнера, вартість перебування контейнера на контейнерному майданчику станції або платформи та його охорона тощо.

Іншою складовою цільової функції, яку необхідно врахувати, є додаткові витрати, пов'язані з неповносоставністю маршрутного поїзда. Отже, враховуючи те, що недоцільно засмічувати цільову функцію елементами, що не залежать від керуючих або звичайних змінних моделі, такі як, наприклад, витрати, пов'язані безпосередньо з просуванням контейнерних поїздів, адже вони в будь-якому випадку будуть реалізовані у разі відправлення цих поїздів. Однак слід зазначити необхідність врахування додаткових витрат у разі відправлення неповносоставних поїздів, адже в такому випадку собівартість транспортування даної партії контейнерів зростає та відповідно зростає питома собівартість транспортування контейнера для залізничної компанії. Це факт можна пояснити тим, що у разі відправлення неповносоставного контейнерного поїзда собівартість його спорядження, відправлення та просування по лінії майже не зміниться однак частина вагоно-місць або контейнеромісць у поїзді фактично не будуть оплачені клієнтами. Таким чином, додаткові витрати виникають в обсязі вартості перевезень контейнерів у кількості,

що дорівнює різниці між нормативною кількістю у складі поїзда і фактичною кількістю:

$$C = \sum_{i=1}^{N^{мер}} \left(\left(m - \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt \right) \left(m > \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt \right) \right) m_i, \quad (3)$$

де m_i – норма кількості фітінгових платформ і відповідної кількості контейнерів у перерахуванні на сорокафутові контейнери (FEU) у складі контейнерного поїзда, що формується на i -ї термінальній станції;

C_i^{kn} – вартість просування контейнерного поїзда, що відповідає нормативній кількості вагонів, від i -ї термінальної станції до порту.

Як було зазначено вище, контейнерні перевезення і особливо інтермодальні, у яких одночасно беруть участь декілька незалежних транспортних операторів і компаній, пов'язані з ризиком.

Також слід зазначити, що відправлення контейнерного поїзда з перевищенням норми кількості вагонів також може бути економічно виправданим, оскільки у випадку доставлення партії контейнерів у неповному обсязі може призвести до накладення штрафних санкцій. Є звісно гранична межа кількості контейнерів і відповідної кількості фітінгових платформ, обумовлена максимальною умовною довжиною колій на попутних станціях, максимальною вагою поїзда, обумовленою потужністю локомотива, тощо. Отже, склад контейнерного поїзда може за чисельністю вагонів перевищувати нормативне значення, проте знаходиться у межах граничних показників. У такому разі можуть виникати додаткові витрати, пов'язані з необхідністю проведення додаткових маневрових робіт при формуванні поїзда. Однак у першу чергу проведення додаткових маневрових робіт у цьому випадку виникає в процесі розвантаження поїзда в порту, адже колії припортової станції, розраховані на довгосоставні поїзди, можуть бути зайняті іншими поїздами. До того ж колії, що знаходяться безпосередньо в порту біля причалів, взагалі не розраховані на довгосоставні поїзди, і тому доведеться здійснювати їхнє розчеплення з послідовним подаванням частин на портову колію для розвантаження. Отже, ці додаткові витрати необхідно розраховувати як

$$C_3 = c^{де} \sum_{i=1}^{N^{мер}} \left(\left(\int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt - m_i \right) \left(\int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt > m_i \right) \right), \quad (4)$$

де $C^{де}$ – питомі додаткові витрати, що припадають на кожен вагон, причеплений до контейнерного поїзда поза нормою кількості вагонів.

Як було зазначено вище, якщо фактична кількість наданих контейнерів виявиться меншою, ніж кількість, заявлена оператором для завантаження на контейнеровоз, можуть бути застосовані штрафні санкції. Такі види штрафних санкцій останнім часом вводяться все більшою кількістю морських перевізників, що обумовлено їхнім небажанням втрачати прибутки та відповідним стимулюванням інтермодальних операторів до запобігання порожньому пробігу контейнеромісць, особливо на тлі кардинального підвищення тарифів на контейнерні перевезення у світі. Так, всесвітньо відомий морський перевізник – компанія MSC (Mediterranean Shipping Company) – запровадила штраф за неподання контейнера до перевезення «no show bookings surcharge», який становить 600 дол. за 1 FEU. Отже, необхідно включити до цільової функції елемент, що буде враховувати ці витрати:

$$C = c^{ун} \left(n^{фр} - \sum_{i=1}^{N^{пер}} \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda^*(t) dt \right), \quad (5)$$

де $n^{фр}$ – кількість контейнеромісць, зафрахтованих оператором на контейнеровозі в перерахунку на FEU;

$c^{ун}$ – сума штрафу за один FEU, що не був поданий для навантаження на судно.

Поняття ризику, застосовуване в технічній, економічній і фінансовій сферах, передбачає можливість здійснення не лише якісного, але в першу чергу кількісного оцінювання ризику. Величина ризику вимірюється зазвичай у грошовому еквіваленті і може бути обчислена як добуток імовірності небажаної події та величини матеріального збитку, що виникає внаслідок настання цієї події:

$$R = Q \cdot C^{зб}, \quad (6)$$

де Q – імовірність настання небажаної події;

$C^{зб}$ – величина матеріального або фінансового збитку.

Організація формування та доставки контейнерних партій до порту не виключає можливості несвоєчасного прибуття хоча б одного з контейнерних поїздів, що у свою чергу призведе до затримки судна з вини залізничного перевізника, і накладання портом відповідних штрафних санкцій. Ця

можливість несвоєчасного прибуття поїздів до порту є наслідком впливу багатьох факторів, більшість з яких знаходиться поза межами контролю залізничного оператора, або цей контроль є лише поодиноким і не дає змогу повністю виключити можливість настання цієї небажаної події. До того ж імовірність запізнення контейнерного поїзда безпосередньо залежить від управлінських рішень, пов'язаних із процесом накопичення контейнерних партій на термінальних залізничних станціях. Час на просування поїзда від термінальної залізничної станції до порту має бути в часовому проміжку між моментом завершення накопичення контейнерної партії на термінальній станції та моментом відправлення судна, урахувавши також тривалість навантаження. Через те, що перевезення здійснюється маршрутним поїздом, то, на перший погляд, раціональним рішенням може бути приймання цього часу просування за сталу величину, що залежить від довжини маршруту, або принаймні моделювання його як випадкової величини, що має незначні коливання, з використанням нормального закону розподілу. Однак такий підхід був би можливим лише в умовах розвинених європейських країн, якщо, наприклад, контейнери перевозяться поїздом типу shuttle train, тобто залізничним контейнерним експресом, що прямує практично без зупинок і зі сталою швидкістю по спеціально виділених нитках графіка та в умовах, коли вантажний залізничний рух відокремлений від пасажирського. В умовах української залізничної системи вантажний і пасажирський рух здійснюються з використанням однієї інфраструктури, до того ж пасажирські поїзди мають вищий пріоритет. Такий суміщений рух у купі з високою вантажнапруженістю ліній призводить до швидкого зносу рейок і виходу з ладу елементів верхньої будови колії, частой необхідності виділення вікон для здійснення планових і позапланових ремонтів. Довжина ліній, на яких діють попередження про необхідність обмеження швидкості руху поїздів, пов'язані або зі станом колій, або проведенням ремонтних робіт, становить у середньому більше половини загальної протяжності ліній залізничної системи України. До того ж рух переважної більшості вантажних поїздів здійснюється не за сталим розкладом, а готовністю і диспетчерським розкладом. Однак найбільш дестабілізуючим фактором, що призводить до значних затримок при просуванні контейнерних поїздів, є припортові станції. На припортових станціях зазвичай відбувається скупчення великої кількості составів унаслідок нестачі магістральних і маневрових локомотивів, локомотивних бригад, невідповідності колійного розвитку станцій сучасним обсягам руху, сезонним перенавантаженням тощо. Це може призводити до багаточасових затримок при просуванні

контейнерного поїзда від припортової станції до порту. У декількох попередніх дослідженнях було доведено, що цей час зазвичай підпорядковується закону Ерланга. Отже, особливо враховуючи його певну універсальність, саме цей закон розподілу доцільно використовувати для моделювання тривалості просування контейнерного поїзда від термінальної залізничної станції до порту як випадкову величину безперервного типу. Запізнення поїзда відбудеться при перевищенні часу його

$$Q\{\tau^{np} > (T^c - \tau^{нав} - t)\} = 1 - P\{\tau^{np} \leq (T^c - \tau^{нав} - t)\} = 1 - F(T^c - \tau^{нав} - t; k, \lambda) \quad (7)$$

де τ^{np} – тривалість просування контейнерного поїзда як випадкова величина;

$\tau^{нав}$ – тривалість навантаження контейнерів на судно-контейнеровоз, яка залежить від обсягу контейнерної партії;

t – змінна, що набуває значення моменту часу завершення накопичення контейнерної партії;

T^c – момент часу відбуття судна за графіком його руху.

просування на шляху між термінальною станцією та портом часового інтервалу, між моментом часу закінчення накопичення контейнерної партії та гранично можливим моментом часу початку навантаження контейнерної партії на судно-контейнеровоз з урахуванням планового моменту часу його відбуття.

Отже, величина імовірності запізнення поїзда є комплементарною до величини імовірності його вчасного прибуття, яку можна розрахувати як

відправлення контейнеровоза за його розкладом з урахуванням часу на навантаження, тобто імовірність вчасного прибуття поїзда до порту та відповідно його запізнення як функція від t ;

$F(T^c - \tau^{нав} - t; k, \lambda)$ – кумулятивна функція розподілу закону Ерланга (англ. Cumulative Distribution Function, CDF), де k та λ – параметри розподілу Ерланга.

Отже, імовірність затримки судна-контейнерного поїзда до порту можна розрахувати як таке:

$Q\{\tau^{np} > (T^c - \tau^{нав} - t)\}$ – імовірність того,

що час просування поїзда не перевищить тривалість часового вікна, обмеженого моментом часу закінчення накопичення контейнерної партії та моментом часу

$$Q\{\tau^{np} > (T^c - \tau^{нав} - t)\} = 1 - \frac{\gamma(\lambda \cdot (T^c - \tau^{нав} - t))}{\Gamma(k)} = 1 - \frac{\gamma(\lambda \cdot (T^c - \tau^{нав} - t))}{(k-1)!} = 1 - \left(1 - \sum_{j=1}^k \frac{e^{-\lambda(T^c - \tau^{нав} - t)} (\lambda \cdot (T^c - \tau^{нав} - t))^j}{j!} \right) = \sum_{j=1}^k \frac{e^{-\lambda(T^c - \tau^{нав} - t)} (\lambda \cdot (T^c - \tau^{нав} - t))^j}{j!} \quad (8)$$

де $\gamma(\dots)$ – нижня неповна гамма-функція.

Перехід від гамма-функції $\Gamma(k)$ до факторіала $(k-1)!$ був здійснений завдяки тому,

що $k \in \mathbb{N}^+$, тобто параметр k належить до множини додатних цілих чисел.

На рис. 1 наведений механізм визначення імовірності запізнення контейнерного поїзда в разі розподілу величини тривалості часу перевезення за законом Ерланга за допомогою кумулятивної функції розподілу цього закону.

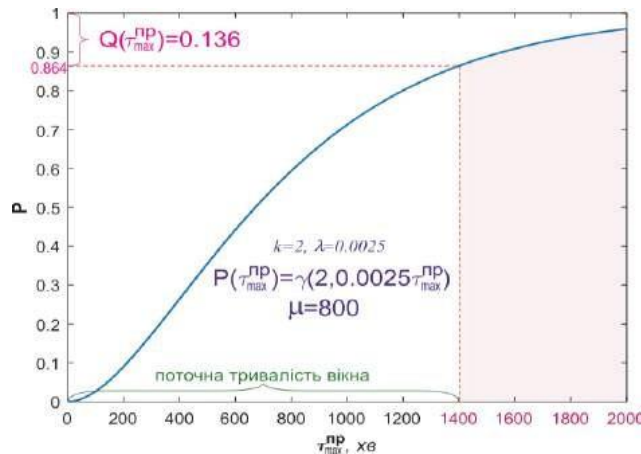


Рис. 1. Визначення імовірності запізнення контейнерного поїзда в разі розподілу величини тривалості часу перевезення за законом Ерланга, за допомогою кумулятивної функції розподілу цього закону

На рис. 2 наведена схема визначення імовірностей затримки судна внаслідок запізньєнь контейнерних поїздів, потрібна для визначення сумарної функції ризику, адже фактично штрафна функція є дискретною, оскільки затримка, наприклад, на 15 год від наступної години все одно призводить до штрафної виплати за цілу годину.

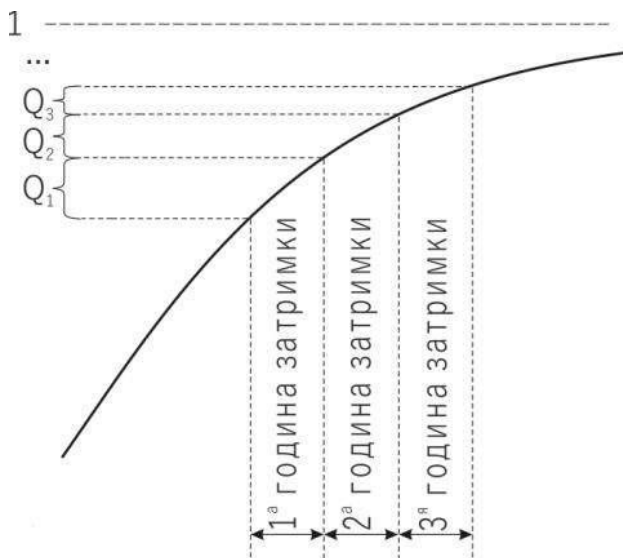


Рис. 2. Визначення погодинних імовірностей затримки судна внаслідок запізньєнь контейнерних поїздів

Однак у разі одночасного накопичення контейнерних партій на декількох термінальних станціях і відповідно відправлення з кожної цієї

станції маршрутного контейнерного поїзда в бік порту імовірність затримки судна дорівнює імовірності випадку, коли хоча б один з цих поїздів прибуде до порту з запізненням. Отже, ураховуючи те, що запізнення кожного окремого поїзда є незалежною подією, та одночасно ці події є сумісними, тобто не виключається той факт, що вони можуть відбуватися разом, імовірність випадку, що принаймні один поїзд прибуде з запізненням, за теоремою про додавання імовірностей для сумісних подій, дорівнюватиме сумі імовірностей запізньєнь кожного окремого поїзда.

Отже, імовірність затримки судна можна розрахувати як

$$Q^{зс} = \sum_{i=1}^{N^{тер}} \sum_{j=1}^{k_i} \frac{e^{-\lambda_i \cdot (T^c - \tau^{нав} - t_i)} (\lambda_i \cdot (T^c - \tau^{нав} - t_i))^j}{j!}, \quad (9)$$

де k_i та λ_i – відповідно параметр ступеня (або форми) і параметр інтенсивності закону розподілу Ерланга, якому підпорядковується величина тривалості маршруту контейнерного поїзда, що прямує від i -ї термінальної станції до порту.

Тоді наступну складову цільової функції, що являє собою ризик затримки судна-контейнеровоза з провини залізничного оператора, можна записати як

$$C_5 = R = Q^{3c} c^{3c} = c^{3c} \sum_{i=1}^{N^{мер}} \sum_{j=1}^{k_i} \frac{e^{-\lambda_i \cdot (T^c - \tau_{нав} - t_i)} \left(\lambda_i \cdot (T^c - \tau_{нав} - t_i) \right)^j}{j!}. \quad (10)$$

Отже, цільову функцію можна подати як

$$E\left(\{t_1, t_2 \dots t_n\}, \{\lambda_1^*(t), \lambda_2^*(t) \dots \lambda_n^*(t)\}, \{\theta_1, \theta_2 \dots \theta_n\}\right) = \sum_{i=1}^5 C_i, \quad (11)$$

де $\{t_1, t_2 \dots t_n\}$ – змінний вектор моментів завершення накопичення контейнерних поїздів;

$\{\lambda_1^*(t), \lambda_2^*(t) \dots \lambda_n^*(t)\}$ – множина функцій

умовної інтенсивності, що являють собою потоки надходження контейнерів;

$\{\theta_1, \theta_2 \dots \theta_n\}$ – множина розподілів

тривалостей просування контейнерних поїздів (поданих як відповідні параметри) між термінальними залізничними станціями і портом.

Також необхідно врахувати обмеження, що накладаються на керуючі змінні технологічним процесом. Так, необхідно врахувати обмеження за максимальною довжиною поїздів, що формуються, у фізичних вагонах:

$$\int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt \leq m_i, \quad i = 1 \dots N^{мер} \quad (12)$$

На основі сформованої моделі було розроблене програмне забезпечення та проведено моделювання. У таблиці наведені вихідні дані для розрахунку.

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Значення	Одиниця вимірювання
Прогнозна умовна інтенсивність нестационарного пуасонівського процесу надходження контейнерів (у перерахуванні на TEU) до першої термінальної станції	$\lambda_1^*(t)$ $8.2019 \cdot 10^{-27} t^8 - 4.869 \cdot 10^{-24} t^7 - 4.7899 \cdot 10^{-19} t^6 + 2.519 \cdot 10^{-15} t^5 - 5.0406 \cdot 10^{-12} t^4 + 4.0412 \cdot 10^{-9} t^3 - 7.2505 \cdot 10^{-7} t^2 - 0.0001538t + 0.10832$	FEU/хв
Прогнозна умовна інтенсивність нестационарного пуасонівського процесу надходження контейнерів (у перерахуванні на TEU) до другої термінальної станції	$\lambda_2^*(t)$ $5.5929 \cdot 10^{-26} t^8 - 7.8894 \cdot 10^{-22} t^7 + 4.6203 \cdot 10^{-18} t^6 - 1.441 \cdot 10^{-14} t^5 + 2.5387 \cdot 10^{-11} t^4 - 2.4372 \cdot 10^{-8} t^3 + 1.0803 \cdot 10^{-5} t^2 - 0.0012039t + 0.09046$	FEU/хв
Вартість контейнеро-хвилини при перебуванні контейнерів на термінальних залізничних станціях	$c_1^{к:хв} = 0,1$, $c_2^{к:хв} = 0,2$	$\frac{\$}{\text{FEU} \cdot \text{хв}}$
Вартість спорядження та просування контейнерного поїзда від першої термінальної станції до порту	4000	дол.
Вартість спорядження та просування контейнерного поїзда від другої термінальної станції до порту	5500	дол.
Параметри форми і масштабу тривалості просування контейнерного поїзда від першої термінальної станції до порту, як випадкової величини, розподіленої за законом Ерланга	$k_1 = 2, \mu_1 = 400$	од., хв
Параметри форми і масштабу тривалості просування контейнерного поїзда від другої термінальної станції до порту, як випадкової величини, розподіленої за законом Ерланга	$k_2 = 2, \mu_2 = 500$	од., хв
Додаткові витрати при перевищенні норми кількості фітінгових платформ у складі контейнерного поїзда на одну одиницю (на обох напрямках)	200	дол.
Кількість заброньованих на судні контейнеромісць у перерахуванні на FEU	73	FEU
Момент часу закінчення навантаження судна і його відплигтя, хв, від моменту початку планового розрахункового періоду, хв	1600	хв
Тривалість навантаження одного контейнера	5	хв/FEU

Штраф за неподання до навантаження на судно 1 FEU	600	дол./FEU
Вартість години затримки судна	5000	дол./год

На рис. 3 графічно зображено функції умовної інтенсивності випадкових потоків надходження контейнерів до термінальних станцій, наведених у таблиці.

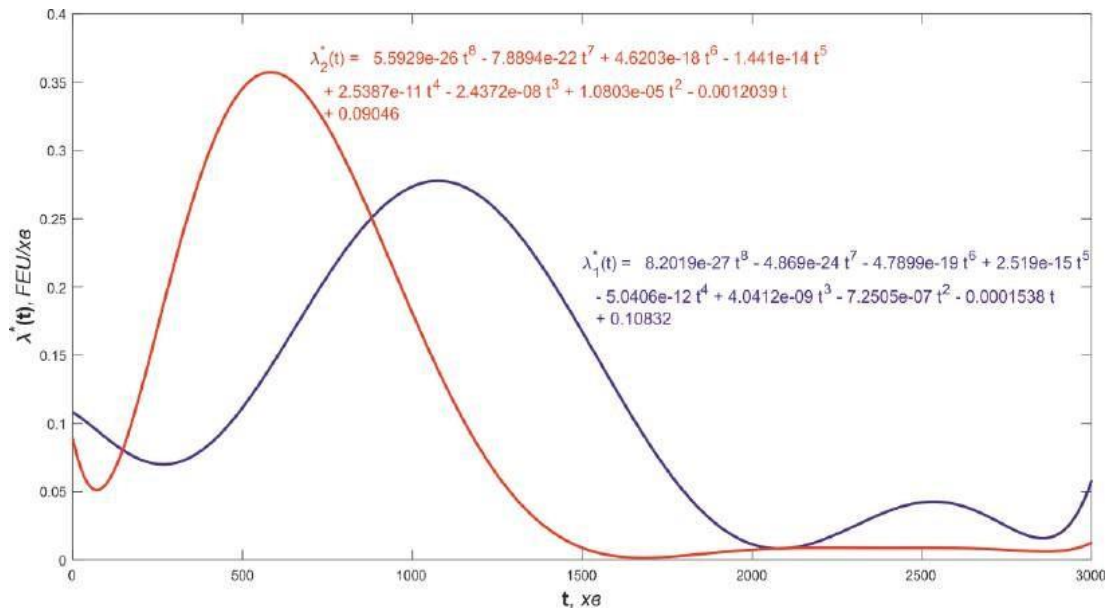


Рис. 3. Функції умовної інтенсивності випадкових потоків надходження контейнерів

На рис. 4 графічно зображено цільову функцію моделі та результат її оптимізації. У випадку двох термінальних станцій цільова функція являє собою поверхню. Однак у випадку більшої кількості термінальних станцій і відповідно більшої кількості контейнерних поїздів цільову функцію неможливо буде подати у графічному вигляді та знайти її мінімум

методами функціонального аналізу. Отже, оптимізацію запропонованої моделі в загальному випадку можна класифікувати як задачу нелінійної оптимізації. Тому розроблена процедура оптимізації запропонованої моделі використовує сучасний математичний апарат генетичних алгоритмів.

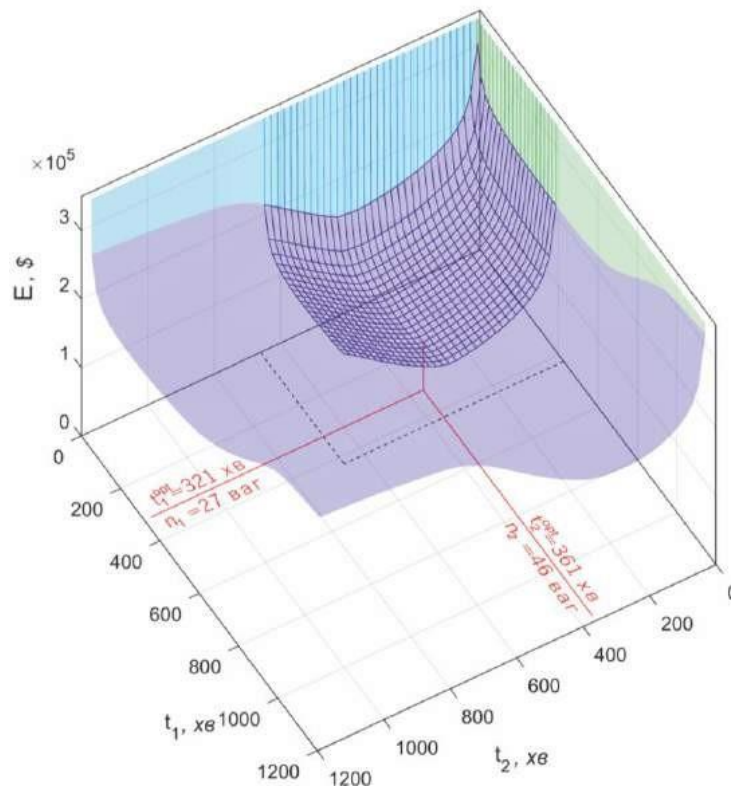


Рис. 4. Цільова функція моделі та результат її оптимізації

Як видно з рисунка, отримані оптимальні тривалості формування контейнерних поїздів становлять відповідно 321 хв для першого поїзда та 361 хв для другого поїзда, передбачається, що за ці періоди буде накопичено для першого поїзда 27 контейнерів і 46 контейнерів для другого поїзда відповідно. При цьому було досягнуто мінімального значення цільової функції, що дорівнює 69168,9.

Висновки

Отримані результати розрахунків і характер цільової функції свідчать про те, що недотримання оптимальних умов режимів формування контейнерних поїздів для просування контейнеропотоків до порту з великою імовірністю призведе до значних додаткових експлуатаційних витрат логістичних операторів при здійсненні інтермодальних контейнерних перевезень. Отже, у результаті дослідження було з'ясовано, що ефективне управління процесом формування контейнерних поїздів відіграє важливу роль у забезпеченні своєчасного доставлення вантажів у міжнародному сполученні. Важливим аспектом запропонованої моделі є врахування ймовірнісних складових моделі, що належать як до процесу накопичення контейнерів, так і процесу просування контейнерних поїздів до порту. У цьому контексті планування доставки контейнерів декількома поїздами

– складне завдання, з практичної точки зору, однак запропонована модель дає змогу достатньо ефективно передбачити оптимальні моменти завершення формування поїздів завдяки приведенню всіх імовірнісних складових до єдиного імовірнісного поля. Введення до складу моделі ризикової складової забезпечує мінімізацію імовірності отримання штрафних санкцій і їхнього обсягу для залізничних або інтермодальних операторів і є одним із ключових її елементів.

Отримані результати розрахунків довели, що оптимізація процесу формування контейнерних поїздів з урахуванням зазначених вище факторів дає змогу знизити затримки, підвищити ефективність перевезень і забезпечити своєчасне доставлення вантажів на судно-контейнеровоз. Це має значне практичне значення для портових операторів, логістичних компаній та інших учасників логістичного ланцюга, які прагнуть підвищити операційну ефективність і забезпечити високу якість послуг.

Отже, сформована математична модель може бути застосована як основа для побудови СППР для інтермодальних операторів, що використовують залізничний транспорт при здійсненні міжнародних контейнерних перевезень.

Список використаних джерел

1. De Langen P. W., Chouly A. Hinterland access regimes in seaports. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*. 2004. 4(4). P. 361–380.
2. Yan B., Zhu X., Lee D-H. Jin J. G., Wang L. Transshipment operations optimization of sea-rail intermodal container in seaport rail terminals. *Computers & Industrial Engineering*. 2020. 141(6):106296.
3. Hu Q., Wiegman B., Corman F., Lodewijks G. Integration of inter-terminal transport and hinterland rail transport. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. 2019. 31. P. 807–831.
4. Butko T., Prokhorov V., Kolisnyk A., Parkhomenko L. Devising an automated technology to organize the railroad transportation of containers for intermodal deliveries based on the theory of point processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 1(3). P. 6–12.
5. Fathi-Vajargah B., Khoshkar-Foshtomi H. Simulating of poisson point process using conditional intensity function (Hazard function). *International Journal of Advanced Statistics and Probability*. 2014. 2(1). P. 34–41.

Parkhomenko L. O., Prokhorov V. M., Kalashnikova T. Yu., Shander O. E. Development of an DSS to manage the process of forming container trains within the intermodal transportation system.

Abstract. In today's transportation market, intermodal container transportation plays an important role in ensuring the efficient transportation of goods both internationally and domestically. In this context, the use of rail transport on land transportation routes is becoming increasingly important due to its higher carrying capacity, energy efficiency, and environmental friendliness.

The purpose of this study is to improve the model for managing the processes of forming container trains and ensuring their timely delivery to a container ship. A model is proposed that takes into account the peculiarities of interaction between various participants in the process, including port terminals, railway stations and ship operators.

The study has shown that effective management of the container train formation process plays an important role in ensuring timely delivery of goods. Particular attention is paid to the probabilistic components of the model related to the process of accumulation of containers and their movement to the port. The model allows for efficient optimization of the moments of train formation completion, taking into account a number of constraints.

The results of calculations and analysis have shown that failure to comply with the optimal conditions for the formation of container trains is likely to lead to significant additional operating costs for logistics operators in intermodal transportation. The proposed model can serve as a basis for a decision support system (DSS) in the field of managing the delivery of containers to the port by land when using container trains. This will increase the reliability of planning and improve the coordination of processes, ensuring timely delivery of containers to the container ship and increasing the efficiency of intermodal transportation.

In general, the use of the developed mathematical model will help to improve operational efficiency and ensure high quality of services, which is a significant factor for port operators, logistics companies and other participants in the supply chain.

Keywords: intermodal container transportation, container train, random flow, point process theory.

Надійшла 13.07.2023 р

Пархоменко Лариса Олексіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8963-6467>.

E-mail: parhomenko@kart.edu.ua.

Прохоров Віктор Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>.

E-mail: prokhorov@kart.edu.ua.

Калашнікова Тетяна Юрїївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6563-5945>.

E-mail: bulavina_ty@ukr.net.

Шандер Олег Едуардович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3330-2588>.

E-mail: shander@kart.edu.ua.

Shander Oleg, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3330-2588>. E-mail: shander@kart.edu.ua.

Parkhomenko Larysa, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8963-6467>. E-mail: parhomenko@kart.edu.ua.

Prokhorov Viktor, Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>. E-mail: prokhorov@kart.edu.ua.

Kalashnikova Tetiana, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6563-5945>. E-mail: bulavina_ty@ukr.net.