

Формування автоматизованої технології організації транспортування контейнерів залізницею при здійсненні інтермодальних перевезень на основі теорії випадкових потоків**Т. В. Бутько, В. М. Прохоров, А. В. Колісник, Л. О. Пархоменко**

Значна кількість проблем та пов'язані із ними додаткові витрати операторів виникають внаслідок недосконалості існуючої технології оперативного планування роботи залізничного транспорту у складі системи інтермодальних перевезень. Джерелом цих проблем виступає не лише процес транспортування контейнерів залізничними шляхами, значний вклад у їх виникнення та розвиток вносять також і процеси, що протікають безпосередньо до та після нього. Ці процеси характеризуються певним рівнем невизначеності, який є наслідком їх імовірнісної природи. Їх випадковий характер провокує перепростой рухомого складу, які спричиняють додаткові операторські витрати та зниження якості обслуговування клієнтів. Однак безпосередній вплив на них є дуже ускладненим або економічно недоцільним.

Показано, що врахування імовірнісної природи цих процесів з метою зменшення їх негативного впливу є найбільш ефективним саме на етапі оперативного планування роботи залізничних підприємств, що задіяні в процесі інтермодальних перевезень. Зазначено, що для підвищення якості такого планування необхідне одночасне врахування випадкових чинників процесів формування і обробки контейнерних поїздів на станціях, їх просування по дільницях та передачі до порту. Однак особливої уваги потребує процес надходження контейнерів до термінальних залізничних станцій.

Було доведено, що ключовим моментом у вирішенні проблеми синхронізації цих процесів є формування автоматизованої технології організації транспортування контейнерів залізницею.

З цією метою було формалізовано технологічний процес формування і просування контейнерних поїздів до морських портів у вигляді моделі стохастичної оптимізації із використанням математичного апарату теорії випадкових потоків. Критерій оптимізації даної моделі представляє експлуатаційні витрати оператора при організації залізничної частини інтермодальних перевезень. Стохастичний характер моделі дозволяє відшукати оптимальні параметри оперативного плану організації контейнерних перевезень одночасно контролюючи рівень впевненості у можливості реалізації цього плану враховуючи імовірнісну природу складових процесів.

На основі розробленої моделі створене програмне забезпечення у середовищі Matlab та сформовано автоматизовану технологію просування контейнерних поїздів. Застосування запропонованої моделі при формуванні автоматизованої технології залізничних контейнерних перевезень дозволить зменши-

ти експлуатаційні витрати залізничної частини інтермодальних контейнерних перевезень щонайменше на 10 %

Ключові слова: інтермодальні контейнерні перевезення, випадкові точкові процеси, стохастична оптимізація, залізничні контейнерні перевезення

1. Вступ

Управління інтермодальними перевезеннями – складний і відповідальний процес. При здійсненні міжнародних і міжконтинентальних контейнерних перевезень разом із морським транспортом традиційно використовується залізничний транспорт. Задача залізничного транспорту полягає у забезпеченні транспортування по так званих «сухопутних мостах» – сухопутних ділянках, на яких маршрут починається або закінчується, або через які він проходить транзитом. Незважаючи на значний рівень комп'ютеризації і інформатизації, рівень затримок доставки вантажів у галузі контейнерних інтермодальних перевезень не зменшується. Незадовільна швидкість просування контейнерних поїздів є суттєвим фактором виникнення цих затримок. Дана проблема є загальною, а не лише постає перед інтермодальними операторами, що експлуатують Сибірський і Євразійський континентальні сухопутні мости, які проходять відповідно територією Росії та Казахстану і використовуються для доставки товарів із Японії, Південної Кореї і Тайваню до країн Східної Європи. Вона стосується також і Американського та Канадського сухопутних мостів, через які японські товари потрапляють до споживачів у США і Канаді, та через порти Німеччини і Нідерландів до споживачів у Західній Європі. Така ситуація склалася внаслідок відсутності дієвих підходів до побудов систем управління, які б демонстрували високий рівень ефективності в умовах невизначеності, яка є природною складовою перевізного процесу. У випадку залізничної доставки контейнерів до порту важливим також є питання узгодженості цього процесу із розкладом прибуття суден.

Таким чином, актуальною задачею є формування автоматизованої технології організації контейнерних залізничних перевезень, яка б забезпечила високий рівень надійності та конкурентоспроможності системам інтермодальних контейнерних перевезень за рахунок створення та використання системного ефекту при взаємодії підприємств залізничного і морського транспорту.

2. Аналіз літератури та постановка проблеми

Одним із основних напрямків дослідження в цієї галузі є постановка і вирішення задач, пов'язаних із оптимізацією топології маршрутів інтермодальних перевезень на логістичних засадах. Зокрема у [1] запропонована задача вибору кращого із 36 маршрутів інтермодальних перевезень, які беруть начало на материковій частині Китаю і пролягають через Індійський Океан, на основі методів цільового програмування. Запропоновані методи дозволяють аналізувати конкуруючі рішення на основі декількох критеріїв, але при виборі маршруту не враховуються критерії, що пов'язані з фактором часу, як, наприклад, розклад прибуття суден до порту. У [2] запропонована модель на основі використання нечіткої логіки, яка дозволяє оцінити ефективність існуючих маршрутів інтермодальних перевезень. Однак дана модель є корисною лише для прийняття

стратегічних рішень по зміні маршрутів. У [3] запропонована модель цілочисельного програмування для визначення кращого залізничного маршруту доставки контейнерів до порту. Модель оперує із часами доставки як із імовірнісними змінними, але вона не враховує випадкову природу первинних потоків контейнерів. У [4] оцінюється можливість відкриття нових маршрутів інтермодальних контейнерних перевезень між Європою та Азією, аналізуються підстави для створення нових Оксамитових шляхів, однак конкретна модель або метод прокладення їх маршрутів не представлені. У [5] вирішується задача ефективного розташування інтермодальних контейнерних терміналів із залученням математичного апарату генетичних алгоритмів. Однак у якості критерію запропоновані лише безпосередні витрати на транспортування вантажу. При визначенні місць розташування контейнерних терміналів не враховуються такі сучасні концепції як «сухий порт» тощо. У [6] запропоноване вирішення задачі географічного розташування контейнерних хабів для підвищення ефективності взаємодії залізничного і морського транспорту в європейській системі інтермодальних перевезень. Однак для залізничного сполучення між хабами запропоноване використання лише швидкісних контейнерних експресів, а застосування поїздів інших категорій не передбачається. У [7] наведено моделі для вироблення стратегій по додатковій підготовці потоків контейнерів з метою оптимізації складного процесу перевантаження контейнерів із поїздів до суден із урахуванням невизначеності. Однак прийняте у роботі припущення про розподіл випадкової величини кількості за рівномірним законом викликає сумнів. У роботі [8] запропоновано модель, яка в оперативному режимі дозволяє управляти процесом розміщення контейнерів у порту при здійсненні завантаження та розвантаження поїздів і суден. Дана модель дозволяє оптимізувати процес перевантаження контейнерів за рахунок урахування прогнозованої інформації про прибуття поїздів та суден, кількість вільних місць у них. Однак використання горизонту планування величиною довше 7 діб свідчить про те, що імовірнісна природа контейнеропотоків в моделі не врахована належним чином.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є формування автоматизованої технології організації просування контейнерних поїздів при здійсненні інтермодальних перевезень в умовах взаємодії залізничних перевізників із морським портом.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені такі завдання:

- проаналізувати проблеми, що пов'язані із існуючою технологією залізничної доставки контейнерів до порту та сформулювати вимоги до автоматизованої технології організації процесу транспортування контейнерів, яка зможе їх вирішити;
- на основі аналізу визначити математичний апарат, який дозволяє адекватно моделювати числові характеристики у часі контейнеропотоків при формуванні і просуванні поїздів в умовах інтермодальних перевезень;
- сформулювати математичну модель процесу оперативного планування роботи залізничних напрямків в умовах транспортування контейнерів з урахуван-

– провести моделювання із використанням розробленої моделі та проаналізувати його результати.

4. 1. Аналіз проблем залізничної доставки контейнерів до порту та формування вимог до автоматизованої технології її організації

Типову схему полігону, що відповідає сухопутній частині шляху, яку долають контейнери за допомогою залізничного транспорту в напрямку морського порту, наведено на рис. 1.

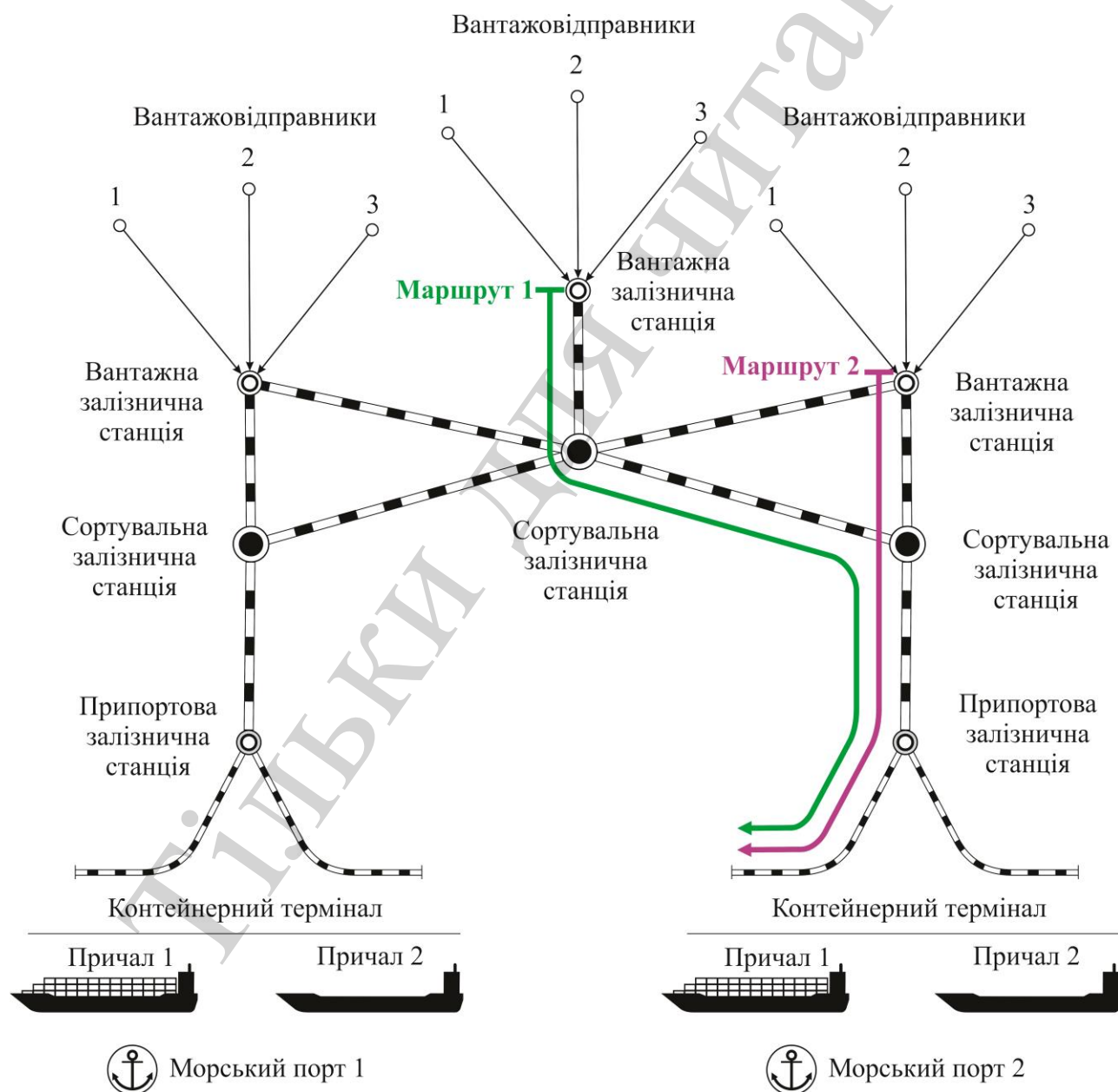


Рис. 1. Схема організації доставки контейнерів залізничним транспортом до морських портів при здійсненні інтермодальних перевезень

Зменшення собівартості переміщення контейнерів на всіх ділянках шляху є ключовим моментом системи інтермодальних перевезень, адже собівартість є їх основною конкурентною перевагою. Використання контейнерів попри зручність при оперуванні ними повинно забезпечувати зменшення використання людської праці, тривалості вантажних операцій, зменшення витрат на охорону та зменшення часу доставки вантажів. Час доставки вантажів для вантажовласників також має важливе економічне підґрунтя. Навіть незначне збільшення швидкості доставки вантажів у міжнародному сполученні для середніх та великих компаній має істотний економічний ефект. Суть даного ефекту полягає у прискоренні обігу оборотних коштів, адже у контейнерах перевозять вантажі, які переважно мають високу питому вартість.

Основним недоліком морської ділянки шляху є значний термін доставки, який пов'язаний із невеликою швидкістю переміщення вантажних суден, витратами часу на перевірку та оформлення документів у портах, можливою необхідністю заходу контейнеровозів до факультативних портів для здійснення вантажних операцій. Разом з тим, морські перевезення і так є найбільш дешевим видом транспорту, а їх подальша оптимізація є можливою як за рахунок організаційних заходів, як, наприклад, удосконалення систем управління процесами експлуатації суден, так і за рахунок впровадження нових технічних рішень, наприклад, підвищення економічності енергетичних установок суден тощо.

Іншою справою є переміщення контейнерів залізничними шляхами України, де організаційні чинники мають вирішальне значення. Застосування недосконалих технологій організації перевезень пов'язане із можливими значними невикористаними втратами часу та збільшенням експлуатаційних витрат для інтермодальних операторів внаслідок перепростоїв поїздів, що містять у своєму складі фітінгові платформи з контейнерами, на сортувальних і припортових станціях. Останнім часом всі ці негативні явища лише підсилюються на фоні посилення таких тенденцій, як нестача тягового рухомого складу, нестача та незадовільний стан парку контейнерів та фітінгових платформ. Ускладнює ситуацію також і поступова деградація залізничної інфраструктури, в наслідок якої зменшується пропускна спроможність ліній та переробних потужностей сортувальних станцій. Крім цього, до значного збільшення експлуатаційних витрат при здійсненні інтермодальних контейнерних перевезень призводить і не своєчасне забезпечення суден контейнерами для завантаження в наслідок надвисокої вартості простою суден. Таким чином, процес організації сухопутної частини інтермодальних перевезень має значні резерви для його оптимізації, однак для цього необхідно розробити сучасну автоматизовану технологію організації залізничних контейнерних перевезень, яка забезпечить належну швидкість доставки контейнерів залізничними шляхами до порту із урахуванням розкладу заходу суден із мінімальними витратами.

Для розроблення такої технології необхідно формалізувати в рамках єдиної моделі процеси накопичення контейнерів на термінальних станціях, формування і просування контейнерів у залізничному сполученні до морських портів в умовах функціонування системи інтермодальних перевезень.

Основна задача управління процесом формування та просування контейнерних поїздів залізничними шляхами для своєчасного перевантаження на морські судна полягає у виборі стратегії накопичення контейнерів на термінальних пунктах. Стратегія накопичення маршрутів, тобто повносоставних поїздів, що містять у своєму складі лише фітінгові платформи із контейнерами і прямують без переробок до припортової станції, на перший погляд здається найбільш раціональною. Відсутність переробок прямих поїздів на сортувальних станціях повинна призводити не лише до зменшення експлуатаційних витрат, але й забезпечувати мінімізацію часу на транспортування контейнерів від термінального пункту до припортової станції. Однак при детальному її вивченні виявляється, що вона також може призводити до значних втрат. Накопичення маршруту з контейнерів може потребувати набагато більше часу, ніж було заплановано. Причиною цього може стати мінливість ринкової кон'юнктури або інші чинники. За таких умов доставка партії контейнерів до порту може не відбутися вчасно, що в свою чергу може стати причиною перепростою судна під навантаженням. Інша стратегія, за якою навіть декілька контейнерів, які прибувають на термінальну станцію, відправляються у бік припортової станції у складі поїздів, що формуються на станції або проходять її транзитом, також може бути неефективною. За такою схемою час доставки контейнерів може значно збільшитись внаслідок проходження переробок на сортувальних станціях, що також може стати причиною додаткового простою судна у порту. Таким чином, раціональним підходом до організації сухопутної частини інтермодальних перевезень є формування змішаної стратегії, яка дозволить визначати найбільш вигідний варіант відправлення контейнерів у бік порту з урахуванням поточної та прогнозної інформації.

Під точною інформацією можна розуміти попередні дані, які станція може отримувати від вантажовідправників. Однак достовірність навіть такої інформації ніколи не наближується до 100 %, адже можуть мати місце невірні розрахунки, непередбачувані затримки в наслідок виходу з ладу вантажного обладнання та з інших причин.

Таким чином, адекватна модель технологічного процесу, яка буде придатна для використання у якості основи для формування автоматизованої технології організації транспортування контейнерів залізничними шляхами в рамках системи інтермодальних перевезень, повинна враховувати його стохастичну складову.

4. 2. Вибір математичного апарату

Одразу слід зазначити, що класична теорія ймовірностей спрямована на моделювання імовірності настання одиничних подій або їх комбінацій. Моделювання випадкових процесів, що пов'язані із послідовностями подій у часі, має безліч специфічних особливостей і є складним завданням, однак існують декілька засобів математичного апарату, які здаються такими, що можуть бути застосовані для його вирішення. Наприклад, апарат мереж Петрі був розроблений саме для моделювання дискретних випадкових процесів. Однак при більш детальному його вивченні можна виявити, що даний математичний апарат є

своєрідною «річчю у собі», його практично неможливо застосувати у складі інших математичних моделей, які містять традиційні математичні конструкції. Існує також складність отримання деяких характеристик процесу, до того ж, всі отримані числові характеристики моделі Петрі носять виключно емпіричний характер. Однак побудувати необхідну модель використовуючи виключно мережі Петрі, також практично неможливо. Навіть у самих сучасних версій цього математичного апарату, такого як кольорові мережі Петрі, не існує деяких важливих механізмів моделювання таких процесів як, наприклад, процес накопичення елементів, якими в даному випадку є контейнери. Його можна змодельовувати лише за допомогою введення у модель штучних конструкцій. Як стверджують автори, це обумовлене необхідністю збереження простоти семантики цього популярного математичного апарату.

Іншим кандидатом для вирішення задачі є математичний апарат теорії марковських процесів. Але при детальному його вивченні можна прийти до висновку, що він більше спрямований на теоретичні дослідження. Однак він також не є зручним апаратом для практичного застосування, адже практично неможливо обчислювати і використовувати величини таких показників як, наприклад, багатовимірні щільності та кореляції. Іншим математичним апаратом, який зберігає всю повноту і точність математичного описання випадкових процесів і в той же час спрямований на практичне застосування є математичний апарат теорії випадкових потоків. Його перевагами є можливість описання числових характеристик випадкових послідовностей подій, які відносяться не лише до класу марковських процесів, і які передбачають можливість одночасного настання одразу декількох подій та зміну імовірнісних характеристик у часі. Таким чином, теорія випадкових потоків є найбільш адекватним математичним апаратом для представлення потоків прибуття контейнерів на термінальні залізничні станції.

4. 3. Формування математичної моделі

Ключовим моментом вирішення задачі організації транспортування контейнерів є визначення оптимального часу завершення накопичення контейнерної партії. Цей час повинен відповідати максимуму, або прийнятному значенню імовірності того, що вже накопичена партія контейнерів буде доставлена до порту вчасно і не відбудеться затримки судна. Водночас модель повинна забезпечувати те, щоб кількість контейнерів, які прибули до порту вчасно, була максимальною.

Як довели дослідження, на різних часових інтервалах потоки прибуття мають незалежні паттерни часів прибуття контейнерів на станцію, отже їх можна вважати потоками без післядії, тобто пуасонівськими. Слід зазначити, що ці потоки також є неординарним, адже контейнери можуть прибувати групами, тобто на один момент часу може припадати декілька подій потоку. Для моделювання таких потоків доцільно застосувати пуасонівський потік групованих точок. Також слід враховувати, що інтенсивність реальних потоків прибуття контейнерів на станцію змінюється у часі.

Найбільш важливою величиною, що характеризує даний потік у контексті вирішення поставленої задачі, є функція імовірності настання щонайменше k подій на часовому інтервалі, яку, враховуючи інформацію про генеруючі функції імовірності і кратності [9] для потоків даного типу, можна записати наступним чином:

$$P(k, [t_0, \tau]) = 1 - \exp\left(-\int_{t_0}^{\tau} \Lambda(t) dt\right) \times \sum_{i=1}^{x(s,k)} \prod_{\substack{j=1, \\ \sum q_{ij} < k, q_{ij} \in \mathbb{N}}}^s \frac{\left(\int_{t_0}^{\tau} \lambda_j(t) dt\right)^{q_{ij}}}{q_{ij}!}, \quad (1)$$

де k – кількість контейнерів, які прибудуть на станцію; t_0, τ – моменти початку та завершення планового періоду відповідно; $\lambda_j(t)$ – інтенсивність потоку контейнерів кратності j , як функція від часу; q_{ij} – кількість подій потоку кратності j на часовому інтервалі $[t_0, \tau]$ у i -му випадку розвитку подій; s – максимальна кратність потоку, яка розглядається на даному терміналі; $x(s, k)$ – потужність множини імовірнісних випадків розвитку подій при даних значеннях змінних s та k , коли під випадком розуміється одна з можливих реалізацій потоку, що характеризується множиною $\{q_{i1}, q_{i2}, q_{i3} \dots q_{is}\}$; потоку, яка розглядається на даному терміналі; $\Lambda(t)$ – «ведуча функція потоку» [9], тобто сумарна інтенсивність потоків всіх кратностей як функція від часу, яка визначається як $\Lambda(t) = \sum_{j=1}^s \lambda_j(t)$.

Як зазначено у формулі, при проведенні обчислень по кожному i -му випадку необхідно враховувати всі q_{ij} , які задовольняють відношенню: $q_{i1} + 2q_{i2} + 3q_{i3} + \dots + sq_{is} < k$, тобто такі, що забезпечують неперевищення сумарною кількістю подій потоків всіх кратностей кількості k .

Таким чином, визначимо функціонал $W(P, \tau, \Lambda(t))$, який повертає максимальне значення кількості контейнерів, що із імовірністю P можуть бути накопичені на станції протягом часового інтервалу t із урахуванням змінної у часі інтенсивності $\Lambda(t)$.

Слід також зазначити, що в системі інтермодальних перевезень не лише потоки контейнерів від вантажовідправників до термінальних пунктів є випадковими. Фактор випадковості у повній мірі присутній таким його параметрам, як, наприклад, час переформування поїздів на сортувальних станціях, час переміщення поїзда від припортової залізничної станції у портовий док та багато інших параметрів. Неодноразово доведено [10], що перелічені параметри підпорядковуються нормальному або близьким до нього законами розподілу, фактичні значення цих параметрів можуть відрізнятися від середніх або нормативних у декілька разів. Отже можна стверджувати, що планування транспортних процесів без урахування

різних видів їх невизначеності може значно знижувати якість управління. В умовах високої щільності та когерентності процесів при здійсненні інтермодальних перевезень врахування імовірнісної природи процесів є критично важливим при прийнятті рішень в ході оперативного планування.

З урахуванням вищезазначеного стає можливим формулювання задачі раціональної організації транспортування контейнерів до морського порту за допомогою залізничного транспорту при здійсненні інтермодальних перевезень у вигляді задачі стохастичної оптимізації.

Основним чинником управління за таких умов є визначення часів закінчення накопичення контейнерів і початку їх транспортування до морського порту. Від кількості накопичених контейнерів залежить спосіб і відповідна собівартість їх переміщення: у складі прямого маршруту, у складі неповносоставного прямого поїзда, у складі інших поїздів із подальшим переформуванням на сортувальних станціях на шляху прямування.

Слід зазначити, що така постановка задачі допускає певні варіювання собівартості транспортування контейнерів як на різних залізничних напрямках так і в межах одного напрямку. Однак головною метою є мінімізація сукупних витрат інтермодального оператора при здійсненні доставки контейнерів залізничними шляхами до морського порту. За таких умов у якості критерію доцільно обрати питому величину витрат, що припадає на транспортування одного контейнера. Отже цільову функцію можна визначити наступним чином:

$$C(\tau, P) = \frac{1}{\sum_{i=1}^z (N_i(P, \tau_i) + N_i^0)} \times \left(e_{\kappa-\Gamma} \int_{t_0}^{\tau_i} W_i(P, \tau_i, \Lambda_i(t)) dt + e_{\text{В-КМ}} \cdot l_i + \right. \\ \left. + ((e_{\kappa-\Gamma} + e_{\text{В-Г}})(N_i(P, \tau_i) + N_i^0) + e_{\text{П-Г}}) \times \left(\tau_i + \frac{l_i}{v_i^{\text{дїл}}} + H((m_i - \delta_i) - (N_i(P, \tau_i) + N_i^0)) \right) \times \right. \\ \left. \times \sum_{i=1}^z \times \sum_{j=1}^{S_i} (\mu_{ij}^{\text{пер}} + \sigma_{ij}^{\text{пер}} \sqrt{2} \text{erf}^{-1}(2P - 1)) + \right. \\ \left. + (\mu_i^{\text{порт}} + \sigma_i^{\text{порт}} \sqrt{2} \text{erf}^{-1}(2P - 1)) \right) + \\ \left. + e_{\text{с-Г}} \left((T_i(\tau_i) + (N_i(P, \tau_i) + N_i^0)t_{\kappa}) - t_{\text{зп}} \right) \times \right. \\ \left. \times H((T_i(\tau_i) + (N_i(P, \tau_i) + N_i^0)) - t_{\text{зп}}) \right) \rightarrow \min, \quad (2)$$

де P – поточний рівень імовірності; z – кількість маршрутів доставки контейнерів до порту; τ – змінний вектор часів закінчення накопичення контейнерних партій $\tau = (\tau_1, \tau_2 \dots \tau_z)$ на термінальних станціях маршрутів; $e_{к-г}$ – вартість контейнеро-години; $e_{в-г}$ – вартість вагоно-години; $e_{п-г}$ – вартість поїздо-години; $e_{в-км}$ – вартість вагоно-кілометра; $e_{с-г}$ – вартість судно-години; t_0 – момент початку періоду планування; $\Lambda_i(t)$ – загальна функція інтенсивності прибуття контейнерів на термінальну (початкову) станцію i -го маршруту з урахуванням кратності подій; $W_i(P, \tau_i, \Lambda_i(t))$ – функціонал, який повертає мінімальне значення кількості контейнерів, які із імовірністю P будуть накопичені на термінальній станції i -го маршруту на момент часу τ_i відповідно до функції інтенсивності $\Lambda_i(t)$; $N_i(P, \tau_i)$ – мінімальна кількість контейнерів, яка буде із імовірністю P накопичена на термінальній станції i -го маршруту, яку повертає функціонал $W_i(P, \tau_i, \Lambda_i(t))$; N_i^0 – кількість контейнерів на термінальній станції i -го маршруту на момент початку періоду планування t_0 ; l_i – довжина i -го маршруту від термінальної станції до порту; m_i – норма кількості вагонів у складі поїзда на i -му маршруті із розрахунку, що одна фітінгова платформа перевозить один 40-футовий контейнер; δ_i – максимальне відхилення кількості вагонів у бік зменшення при формуванні прямого контейнерного поїзда на i -му маршруті; $v_i^{дл}$ – середня дільнична швидкість поїзда на i -му маршруті; S_i – кількість сортувальних станцій на шляху прямування за i -м маршрутом; $\mu_{ij}^{пер}$, $\sigma_{ij}^{пер}$ – величини математичного очікування та середньоквадратичного відхилення відповідно при обчисленні квантілі нормального закону розподілу часу переробки поїзда на j -й сортувальній станції i -го маршруту $Q_{ij}^{пер}(P) = \mu_{ij}^{пер} + \sigma_{ij}^{пер} \sqrt{2} \text{erf}^{-1}(2P - 1)$, що містить у своєму складі вагони з контейнерами; $\mu_i^{порт}$, $\sigma_i^{порт}$ – величини математичного очікування та середньоквадратичного відхилення відповідно при обчисленні квантілі нормального закону розподілу часу просування поїзда від припортової станції до порту на i -му маршруті $Q_i^{порт}(P) = \mu_i^{порт} + \sigma_i^{порт} \sqrt{2} \text{erf}^{-1}(2P - 1)$, що містить у своєму складі вагони з контейнерами; $\text{erf}^{-1}(x)$ – зворотна функція похибок Лапласа; $T_i(\tau_i)$ – поточний час прибуття контейнерів по i -му маршруту до порту; t_k – середній час завантаження контейнера на судно; $t_{зн}$ – момент часу закінчення завантаження судна згідно розкладу; H – функція Гевісайда, яка визначена наступним чином:

$$H(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x > 0, \\ 0, & \text{якщо } x \leq 0. \end{cases}$$

Слід також зазначити, що витрати, пов'язані із можливою затримкою судна, враховані у цільовій функції лише з метою підвищення якості планування

роботи залізничного транспорту при взаємодії із морським портом, а не для одночасної оптимізації експлуатаційних витрат підприємств залізничного і морського транспорту.

Оптимізація даної моделі повинна проводитись із урахуванням наступних обмежень:

$$\begin{cases} \tau_i \geq 0, \forall i = 1, 2 \dots q, \\ P \geq P_{\min}, \\ N_i^0 + N_i(P, \tau_i) \leq m_i^{\max}, \forall i = 1, 2 \dots q, \\ \sum_{i=1}^q \int_{\tau_0}^{\tau_i} W_i(P, \tau_i, \Lambda_i(t)) dt \leq N_c, \end{cases} \quad (3)$$

де $P_{\min}$ – мінімально допустимий рівень імовірності при плануванні, тобто мінімальний рівень впевненості у можливості реалізації отриманого плану; $m_i^{\max}$ – максимально допустима кількість вагонів у складі поїзда на i -му маршруті; N_c – кількість вільних місць для завантаження контейнерів на судні.

Перше обмеження необхідне для забезпечення умови невід’ємності часів завершення накопичення контейнерних партій. Друге обмеження забезпечує необхідний рівень здійсненності плану. Третє обмеження запобігає накопиченню контейнерів у кількості, яка перевищує максимально допустимий склад поїзда. Четверте обмеження запобігає накопиченню та перевезенню контейнерів сумарно по всіх терміналах у кількості, яка перевищує кількість вільних місць на судні.

Таким чином, оптимізація розробленої математичної моделі представляє задачу стохастичного програмування.

4. 4. Проведення моделювання та аналіз його результатів

На основі сформованої моделі був розроблений програмний продукт у середовищі Matlab. Досліджуваний полігон представляє собою 2 маршрути доставки контейнерів на одне судно (рис. 1). На кожному маршруті розташована термінальна вантажна станція та сортувальна станція, обидва маршрути проходять через одну припортову станцію і завершуються на території морського порту. У якості механізму оптимізації стохастичної моделі був використаний математичний апарат генетичних алгоритмів. На рис. 2 наведена залежність значення цільової функції від часів завершення накопичення контейнерів на двох термінальних станціях.

Мінімум цільової функції дорівнює \$ 3993,86, що відповідає середньому питомому значенню собівартості транспортування одного контейнера від термінальної станції до морського порту. Цей мінімум досягається при значенні часів закінчення накопичення контейнерів на двох термінальних станціях у 5,52 та 8,05 годин відповідно. Як видно із отриманої залежності (рис. 2), ці значення часів відповідають мінімуму витрат і відділені від критичного часу часовими проміжками

значної тривалості. Критичний час накопичення на обох термінальних станціях дорівнює приблизно 15 годині від початку планового періоду, що пов'язано із включенням режиму використання судна у якості «складу на плаву».

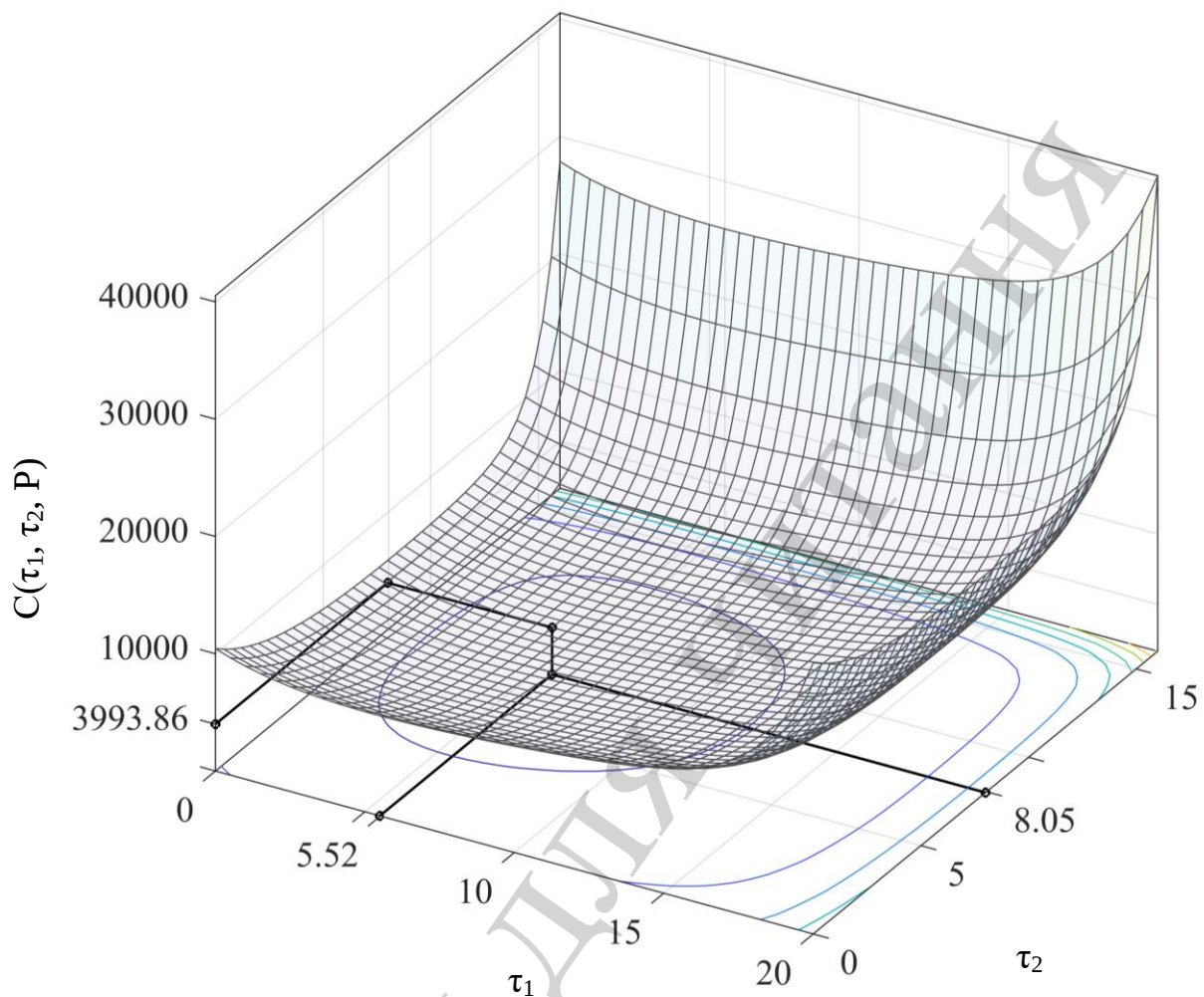


Рис. 2. Залежність питомих витрат, що припадають на транспортування одного контейнера залізницею до морського порту, від часів завершення накопичення партій контейнерів на двох термінальних станціях

Одночасне застосування математичного апарату теорії точкових процесів та класичних підходів теорії імовірності є новим підходом до побудови стохастичних моделей. Теоретично доведено [11], що такий підхід дозволяє отримати покращення точності моделі щонайменше на 10 %. Застосування такої моделі у якості основи для формування технології організації доставки контейнерів до порту при здійсненні інтермодальних перевезень дає підстави для реалізації резервів для зменшення собівартості таких перевезень, реалізації системного ефекту при взаємодії залізничних перевізників і морських портів та підвищення надійності функціонування системи в цілому. Сформовану модель доцільно вважати основою для подальшої автоматизації технологічного процесу транспортування контейнерів в рамках системи інтермодальних перевезень.

5. Обговорення результатів дослідження технології організації транспортування контейнерних поїздів при здійсненні інтермодальних перевезень

Отримана залежність (рис. 2) демонструє наявність екстремуму цільової функції, який досягається при значеннях керуючих змінних, які лежать в межах горизонту планування. Отримане значення мінімуму цільової функції (рис. 2) також узгоджується із даними про собівартість транспортування контейнерів. Це свідчить про адекватність запропонованої моделі.

Формування даної математичної моделі (2), (3) у свою чергу стало можливим завдяки отриманій залежності (1), яка була використана для визначення кількості контейнерів, які будуть накопичені на термінальній станції за певний часовий інтервал і з імовірністю, що перевищує певний встановлений рівень. Отримання коректних числових характеристик випадкового процесу накопичення контейнерів стало можливим завдяки застосуванню при визначенні залежності (1) математичного апарату теорії випадкових потоків. Це дозволяє збільшити точність моделі (2), (3) щонайменше на 10 %. Можливість в рамках єдиної моделі одночасного отримання рішень у вигляді часів завершення накопичення контейнерних партій, які пов'язані єдиним процесом, свідчить про ефективне використання системного ефекту.

Формалізація процесу оптимізації моделі саме у вигляді задачі стохастичного програмування надає можливість коливання числових характеристик контейнеропотоків у відповідності до певного інтервалу імовірності. Така гнучкість моделі дозволяє отримувати рішення вищої якості в порівнянні із детермінованими моделями, які можуть використовувати імовірнісні параметри випадкових процесів лише у вигляді сталих величин.

Результати оптимізації, які представляють часи закінчення накопичення контейнерних партій, безпосередньо впливають не лише на визначення способу перевезення контейнерів (у складі повносостаного, неповносостанового прямого або збірного поїзда), але й забезпечують своєчасність доставки контейнерних партій до порту. Таким чином, використання даної моделі дозволить зменшити простої контейнерів і залізничного рухомого складу на термінальних станціях, а також мінімізувати можливість виникнення простоїв контейнеровозів у портах, що в свою чергу призведе до здешевлення і пришвидшення доставки вантажів у міжнародному сполученні.

Запропонована модель представляє контейнеропотоки у вигляді неординарних і нестационарних потоків Пуассона, що відповідає режиму роботи термінальних станцій, коли вони приймають контейнери від багатьох незалежних вантажовідправників. Це накладає певні обмеження для її застосування у випадках, коли термінальні станції приймають контейнери лише від декількох вантажовідправників і існує наявність вираженої післядії потоків. Модель (2) є універсальною, однак в такому випадку вона потребуватиме використання імовірнісних залежностей, що відповідають іншим типам потоків, наприклад, потоку Ерланга. Однак для деяких практично важливих типів потоків отримання таких залежностей у явному вигляді є непростю задачею, і це є викликом для подальших досліджень. Іншим напрямком подальших досліджень є удоскона-

лення технології роботи сортувальних і припортових станцій з метою пришвидшення обробки та просування контейнерних поїздів.

6. Висновки

1. Аналіз технології організації транспортування контейнерів сухопутною ділянкою маршруту в умовах інтермодальних перевезень виявив проблеми, які полягають у наявності значних перепростоїв контейнерів на вантажних, сортувальних і припортових станціях, виникнення затримок при завантаженні суден. Ці проблеми призводять до збільшення вартості перевезень, недотримання термінів доставки вантажів та інших негативних явищ. Однією з важливих причин цих проблем є недосконалість існуючої технології організації контейнерних перевезень, яка полягає у відсутності дієвих механізмів урахування імовірнісної природи контейнеропотоків та процесів просування контейнерних поїздів на залізничних напрямках. Покращення стану цих проблем є можливим за рахунок впровадження автоматизованої технології організації транспортування контейнерів залізничними шляхами в умовах інтермодальних перевезень. Дана технологія повинна не лише враховувати випадкову природу транспортних потоків, але й узгодити роботу термінальних станцій і портів на основі системного підходу.

2. Реальний процес накопичення контейнерів на вантажних залізничних станціях, які використовуються у якості термінальних пунктів у системах інтермодальних перевезень, може бути представлений у вигляді нестационарного неординарного потоку Пуассона. Це дає можливість, використовуючи залежності, отримані в теорії точкових процесів, відмовитися від детального прогнозування подій процесу накопичення контейнерних партій для отримання його імовірнісних характеристик, здійснюючи лише прогноз динаміки його основної макрохарактеристики – інтенсивності потоку.

3. Процес організації транспортування контейнерів залізницею в умовах інтермодальних перевезень було формалізовано у вигляді оптимізаційної моделі стохастичного програмування. Цільова функція моделі представляє критерій сумарних експлуатаційних витрат який враховує витрати, що пов'язані із простоям контейнерів і залізничного рухомого складу на станціях а також перепростоєм суден у портах, витрати на просування поїздів по залізничних дільницях.

4. Результати, отримані в ході моделювання, свідчать про адекватність розробленої моделі. Вони також є корисними при прийнятті рішень оперативним персоналом залізниць при формуванні і просуванні поїздів, які у своєму складі містять контейнери, до морського порту. Застосування даної моделі у складі автоматизованої технології організації процесу доставки контейнерів залізничними шляхами при здійсненні інтермодальних перевезень дозволяє використовувати системний ефект при взаємодії термінальних залізничних станцій і морських портів. Впровадження даної технології відкриває можливості для зниження більш ніж на 10 % собівартості сухопутної частини транспортування контейнерів у міжнародному сполученні.

Література

1. Yang, X., Low, J. M. W., Tang, L. C. (2011). Analysis of intermodal freight from China to Indian Ocean: A goal programming approach. *Journal of Transport Geography*, 19 (4), 515–527. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.05.007>
2. Bortas, I., Brnjac, N., Dundović, Č. (2018). Transport Routes Optimization Model Through Application of Fuzzy Logic. *PROMET - Traffic&Transportation*, 30 (1), 121–129. doi: <https://doi.org/10.7307/ptt.v30i1.2326>
3. Zhao, Y., Liu, R., Zhang, X., Whiteing, A. (2018). A chance-constrained stochastic approach to intermodal container routing problems. *PLOS ONE*, 13 (2), e0192275. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192275>
4. Wronka, J. (2017). Intermodal transport development within the New Silk Road. *Ekonomiczne Problemy Usług*, 128, 107–117. doi: <https://doi.org/10.18276/epu.2017.128-08>
5. Oudani, M., El Hilali Alaoui, A., Boukachour, J. (2014). An efficient genetic algorithm to solve the intermodal terminal location problem. *International journal of supply and operations management*, 1 (3), 279–296.
6. Kreutzberger, E., Konings, R. (2016). The challenge of appropriate hub terminal and hub-and-spoke network development for seaports and intermodal rail transport in Europe. *Research in Transportation Business & Management*, 19, 83–96. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2016.05.003>
7. Xie, Y., Song, D.-P. (2018). Optimal planning for container prestaging, discharging, and loading processes at seaport rail terminals with uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 119, 88–109. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.09.008>
8. Chang, Y., Zhu, X. (2019). A Novel Two-Stage Heuristic for Solving Storage Space Allocation Problems in Rail–Water Intermodal Container Terminals. *Symmetry*, 11 (10), 1229. doi: <https://doi.org/10.3390/sym11101229>
9. Большаков, И. А., Ракошиц, В. С. (1978). Прикладная теория случайных потоков. М.: Советское радио, 248.
10. Музикіна, С. І., Музикін, М. І., Нестеренко, Г. І. (2016). Дослідження пропускної спроможності сортувальної станції. *Наука та прогрес транспорту*, 2, 47–60. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2016/67289>
11. Wang, Y., Ye, X., Zhou, H., Zha, H., Song, L. (2017). Linking micro event history to macro prediction in point process models. *Proceedings of the 20th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*. PMLR, 54, 1375–1384.