

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

ФАКУЛЬТЕТ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Кафедра управління експлуатаційною роботою

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

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до практичних і лабораторних робіт**

з дисципліни

***«СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В УПРАВЛІННІ
ЗАЛІЗНИЧНИМИ ПІДРОЗДІЛАМИ»***

Харків – 2023

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри управління експлуатаційною роботою 29 серпня 2023 року, протокол № 1.

Методичні вказівки рекомендовано для здобувачів усіх форм здобуття вищої освіти факультету «Управління процесами перевезень» другого (магістерського) рівня спеціальності 275.02 Транспортні технології (залізничний транспорт) освітньо-професійних програм «Організація перевезень і управління на транспорті», «Організація міжнародних перевезень», «Митний контроль на транспорті» та освітньо-наукової програми «Організація перевезень і управління на транспорті».

Укладачі:

професор Т. В. Бутько,
доценти В. М. Прохоров,
Л. О. Пархоменко

Рецензент

професор О. М. Огар

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Основні відомості про теорію точкових процесів.....	7
Розробка СППР для управління процесом формування контейнерних поїздів.....	14
Приклад розрахунку.....	36
Рекомендації щодо вибору інструменту реалізації моделі.....	40
Вихідні дані.....	43
Список літератури.....	48

ВСТУП

В умовах стрімкого розвитку транспортної галузі та, зокрема, вантажних залізничних перевезень в Україні, питання ефективного управління процесом формування контейнерних поїздів у рамках інтермодальних перевезень стає найважливішим завданням. Точність, оперативність та оптимальне використання ресурсів стають ключовими факторами для досягнення конкурентної переваги на ринку транспортних послуг. У цьому контексті розроблення системи підтримки ухвалення рішень, здатної забезпечити високий ступінь автоматизації та оптимізації процесу формування контейнерних поїздів, стає невід'ємною складовою сучасної логістики.

Складність управління і координації численними факторами, що впливають на формування контейнерних поїздів, вимагає інноваційного підходу, заснованого на використанні передових інформаційних технологій та аналітичних методів. Розроблення системи підтримки ухвалення рішень, здатної аналізувати й оптимізувати процеси формування контейнерних поїздів, відкриває нові горизонти для підвищення операційної ефективності та зниження витрат в інтермодальних перевезеннях.

В умовах транспортного ринку, що динамічно розвивається, ефективне управління процесом формування контейнерних поїздів є невід'ємною частиною забезпечення оптимального функціонування інтермодальних перевезень. Система підтримки прийняття рішень (СППР) стає ключовим інструментом для автоматизації та оптимізації цього процесу.

У методичних вказівках представлено завдання, що може бути використано для проведення практичних занять та лабораторних робіт або для самостійного вирішення, яке націлене на розвиток навичок аналізу,

проектування та розроблення системи підтримки прийняття рішень для управління процесом формування контейнерних поїздів. Застосування сучасних інформаційних технологій, математичних моделей і алгоритмів оптимізації дасть змогу здобувачам поглибити свої знання в галузі інтермодальних перевезень та ефективного управління транспортними процесами.

Розроблення СППР, спеціалізованого для управління формуванням контейнерних поїздів, вимагає глибокого розуміння основних принципів і методів інформаційних систем, а також специфіки інтермодальних перевезень. Методичка пропонує здобувачам практичні та лабораторні роботи, які дають змогу оволодіти навичками аналізу, проектування та розроблення таких СППР.

Упровадження інформаційних технологій в управління процесом формування контейнерних поїздів істотно підвищує ефективність і точність прийняття рішень. За сучасних умов упровадження цифровізації СППР має стати ключовим елементом системи управління елементів транспортних систем, зокрема, систем інтермодальних і мультимодальних контейнерних перевезень, тому що вони нададуть можливість автоматизувати процеси планування транспортування контейнерних партій і мінімізувати ризики виникнення небажаних подій.

Передбачено, що в ході освоєння матеріалів при виконанні практичних робіт у здобувачів формуються такі компетенції:

1 ціннісно-сміслова компетентність (формування та розширення світогляду здобувача у сфері використання сучасних інформаційних технологій при управлінні перевізним процесом на залізничному транспорті та на базі концепції СППР;

2 загальнокультурна компетентність (розуміння культурних, історичних та регіональних особливостей, що склалися в Україні та за її

межами у галузі управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту);

3 навчально-пізнавальна компетентність (формування у здобувача зацікавленості про стан та перспективи розвитку інтелектуальних транспортних технологій при прийнятті управлінських рішень; методу їхнього формування з метою розвитку креативної складової компетентності; оволодіння навичками комп'ютерного моделювання; здатність здобувача формувати цілі дослідження; проводити класифікацію складних ситуацій у процесі прийняття рішень, зокрема в умовах вирішення слабо-структурованих проблем у процесі функціонування залізничного транспорту України);

4 інформаційна компетентність (розвиток вмінь здобувача до самостійного пошуку, аналізу, структурування та відбору потрібної інформації в сфері автоматизації процесів прийняття управлінських рішень у перевезенні вантажів та пасажирів за допомогою сучасних інформаційних технологій);

5 комунікативна компетентність (розвиток у здобувача навичок роботи в команді шляхом реалізації групових проєктів у сфері формування локальних та просторово-розподілених СППР, вміння презентувати власний проєкт та кваліфіковано вести дискусію у досліджуваній сфері);

6 компетентність особистісного самовдосконалення (елементи духовного й інтелектуального саморозвитку; підтримка постійної жаги до самовдосконалення та самопізнання шляхом постійного пошуку нетрадиційних підходів до проблеми формування інтелектуальних транспортних технологій).

Отже, завдання, що пропонується до вирішення, передбачає створення прототипу СППР для управління процесом формування контейнерних поїздів і окрім закріплення знань у галузі інтермодальних перевезень, управління експлуатаційною роботою, дає змогу поглибити

знання у сфері аналізу даних, застосування математичних моделей та алгоритмів оптимізації, що складають основу сучасних інформаційних технологій. Успішне засвоєння цього матеріалу надасть здобувачам можливість стати затребуваними фахівцями у галузі транспортного управління і в майбутньому зробити внесок у підвищення ефективності транспортних систем і якості послуг.

ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТЕОРІЮ ТОЧКОВИХ ПРОЦЕСІВ

1 Передумови виникнення та етапи становлення теорії точкових процесів

Витоки теорії точкових процесів сягають у далеке минуле, пов'язане з дослідженням випадкових явищ і ймовірнісних моделей.

Ще Якоб Бернуллі, знаменитий науковець XVII–XVIII століть, вивчав випадкові послідовності подій.

Розвиток теорії ймовірностей і статистики в XIX столітті став відправною точкою для побудови складніших моделей, що містять у собі процеси подій, випадкові точки або випадкові міри. Початкові ідеї та поняття були сформульовані відомими математиками і статистиками того часу.

Одним із ранніх дослідників, які зробили істотний внесок, був Андре Луї Лежандр, який 1805 році запропонував перші основні ідеї та поняття, пов'язані з точковими процесами. На першому етапі теорія точкових процесів розвивалася в галузі статистики та випадкових процесів, де її застосовували для аналізу випадкових явищ на просторовій області.

Спочатку фокус досліджень був зосереджений на процесах подій, що відбуваються в часі [1]. Роботи Пуассона в першій половині XIX століття

зробили значний внесок у розвиток теорії точкових процесів. Він запропонував модель, що описує випадкову появу подій у часі, яку назвав процесом Пуассона [1]. Ця модель ґрунтується на припущенні про незалежність і стаціонарність інтервалів між подіями. Лише на рубежі XIX–XX століть почав розглядатись просторовий аспект. Видатний вчений Анрі Пуанкаре досліджував просторовий розподіл точок на поверхні.

Другою важливою віхою в розвитку теорії точкових процесів стала робота А. А. Маркова наприкінці XIX століття. Він запропонував більш загальний клас моделей, відомих як марковські процеси. Марковський процес має марковську властивість, тобто ймовірність настання майбутніх подій залежить тільки від поточного стану процесу і не залежить від його передісторії [2]. Моделі Маркова широко застосовуються для аналізу різних систем, включно з потоками подій у часі.

Потім Андрій Колмогоров зробив величезний внесок у розвиток теорії ймовірностей, включно з роботою з точковими процесами, що стало важливим кроком у їхній формалізації.

Теорія як така з'явилася лише після другої світової війни. Девід Кокс (David Cox), британський статистик, якого вважають одним із засновників теорії точкових процесів. Він зробив значний внесок у статистику і теорію ймовірностей. У 1955 році Кокс представив теорію точкових процесів, що стала однією з важливих галузей статистики [1]. Його роботи стосувалися широкого спектра тем, включно з оцінюванням параметрів, статистичними моделями, регресійним аналізом і багатьма іншими.

Девід Кокс, Мюррей Розенблатт та багато інших молодих вчених середини XX століття розробили нові методи аналізу точкових процесів і застосували їх у різних галузях, таких як екологія, телекомунікації, геоінформатика та багато інших.

Особливо слід згадати також Алана Грегорі Хоукса (Alan G. Hawkes) – англійського математика, який зробив значний внесок у

розвиток теорії точкових процесів. Алан Хоукс відомий своїми дослідженнями в галузі стохастичних процесів і теорії ймовірностей.

Він запропонував статистичну модель для опису пуасонівських процесів із пам'яттю, що згодом були названі «процесами Хоукса» (Hawkes processes) на його честь. Ці процеси є узагальненням пуасонівських процесів і дають змогу враховувати взаємодію між подіями, що робить їх адекватнішими для моделювання різних явищ у природі та суспільстві.

Важливість роботи Алана Хоукса полягає в тому, що процеси Хоукса знайшли застосування в різних галузях, таких як фінансова математика, біологія, соціологія та інші. Він зробив значний внесок у розвиток стохастичного аналізу та теорії точкових процесів, і його дослідження продовжують впливати на сучасну науку [3].

У ХХ столітті було зроблено багато важливих внесків у розвиток теорії точкових процесів такими вченими, як Барбур, Бачеллі, Бремо, Вір-Джонс, Добрушин, Дуб, Де-лі, Жакод, Калленберг, Керстан, Кокс, Кемпбелл, Ласт, Маттес, Ньюмен, Пальм, Пенроуз, Сливняк, Юкич, Яглом та інші. Основи теорії точкових випадкових процесів викладено в низці фундаментальних книжок, серед яких слід згадати монографії Калленберга, Делі та Вір-Джонса, Мекке, Керстана та Маттеса.

Отже, протягом ХХ століття було зроблено значні не лише теоретичні але й прикладні дослідження в цій галузі, що призвело до розвитку нових методів і моделей.

2 Об'єкт вивчення, основні поняття та визначення теорії

Теорія точкових процесів є важливим інструментом для аналізу та моделювання випадкових подій, що відбуваються у просторі. Вона дає змогу описувати та передбачати розподіл і взаємодію точкових об'єктів,

таких як події, точки на площині або в просторі. Під цими точковими об'єктами можна передбачати події на часовій осі.

Основний об'єкт вивчення в теорії точкових процесів – це інтенсивність або щільність точкового процесу. Інтенсивність являє собою міру щільності точок на просторовій ділянці або в проміжку часу [4]. Вона характеризує ймовірність появи точкового об'єкта в певному місці або моменті часу.

Теорія точкових процесів дає змогу описувати різні типи розподілу точкових об'єктів, такі як однорідні, неоднорідні, кластерні та інші. Вона надає математичні інструменти для аналізу статистичних властивостей точкових процесів, таких як ймовірність утворення кластерів, відстань між точками та інші характеристики.

Однією з основних цілей теорії точкових процесів є побудова моделей, які якнайкраще описують спостережувані дані або явища. Ці моделі дають змогу аналізувати ймовірнісні властивості точкових процесів, робити прогнози та оптимізувати різні процеси.

Основні поняття теорії.

Точковий процес – це стохастичний процес, що описує розподіл випадкових точок у просторі (під простором може розумітись і лінія, що представляє часову вісь). Кожна точка може бути позначена набором параметрів, таких як координати, час появи або інтенсивність.

Інтенсивність точкового процесу – це функція, що визначає ймовірність настання події (появи точки) в певній області простору або в певний момент часу. Зазвичай позначається як $\lambda(x,t)$, де x – просторові координати, а t – час.

Просторова інтенсивність – це інтенсивність точкового процесу відносно координат простору. Вона дає змогу аналізувати просторовий розподіл точок усередині розглянутої області [2].

Часова інтенсивність – це інтенсивність точкового процесу відносно часу. Вона дає змогу аналізувати зміну числа точок залежно від часу [3].

Часовий точковий процес – це тип точкового процесу, в якому основний інтерес полягає в аналізі часових інтервалів між появами точок [4]. Такий аналіз дає змогу визначити характеристики часових інтервалів, такі як середній час між подіями або розподіл часових інтервалів.

Процес Пуассона – це особливий тип точкового процесу, що характеризується незалежністю інтенсивності в часі та просторі. Цей процес відіграє важливу роль у теорії точкових процесів і широко використовується в практичних додатках [5].

Однорідний процес – це процес, у якого інтенсивність не залежить від часу і простору [6]. У такому разі інтенсивність є константою.

Неоднорідний процес – це процес, у якого інтенсивність залежить від часу та/або простору [7]. Цей тип процесів більш гнучкий і дає змогу врахувати різні зміни в часі та просторі.

3 Застосування теорії точкових процесів

У наш час теорія точкових процесів є незамінним інструментом дослідження складних процесів та розроблення складних систем у багатьох галузях.

1 Логістика і транспорт. Теорія точкових процесів знаходить широке застосування в аналізі та оптимізації логістичних систем, таких як системи транспортування і складування. Вона дає змогу моделювати потоки вантажів і визначати оптимальні маршрути та розклади, що сприяє підвищенню ефективності транспортних перевезень і зниженню операційних витрат.

2 Телекомунікації. У галузі телекомунікацій теорія точкових процесів застосовується для аналізу та оптимізації мереж зв'язку. Вона дає

змогу оцінити інтенсивність потоку даних, передбачити навантаження на мережу й оптимізувати її роботу для забезпечення якості обслуговування користувачам.

3 Екологія та географія. Теорія точкових процесів використовується для моделювання та аналізу розподілу біологічних видів, розподілу ресурсів і просторового розміщення об'єктів. Це дає змогу виявляти закономірності в розподілі та оцінювати вплив різних чинників на навколишнє середовище.

4 Фінанси та економіка. У фінансовій сфері теорія точкових процесів застосовується для моделювання часових інтервалів між подіями на фондовому ринку, таких як зміни цін на акції. Це допомагає прогнозувати ринкові тенденції та ухвалювати обґрунтовані інвестиційні рішення.

5 Медицина. У медицині теорію точкових процесів застосовують для аналізу часових інтервалів між медичними подіями, як-от поява захворювань або звернення пацієнтів по медичну допомогу. Це дає змогу виявляти патерни і тренди в захворюваності та вживати заходів щодо контролю за поширенням захворювань.

4 Сучасні тенденції та розвиток

Сьогодні теорія точкових процесів продовжує активно розвиватися, привертаючи увагу багатьох математиків, статистиків і дослідників різних галузей. Ці роботи мають важливе значення для практичних застосувань і дають змогу краще зрозуміти структуру та властивості випадкових процесів, що робить їхні результати цінними та актуальними для наукової спільноти.

Сучасна теорія точкових процесів включає в себе широкий спектр математичних інструментів, таких як статистика, теорія ймовірностей, теорія міри, функціональний аналіз та інші. Вона знаходить застосування в

різних дисциплінах, включно з геостатистикою, екологією, транспортним плануванням, біологією та іншими галузями, де вивчають розподіл випадкових об'єктів у просторі та часі [1].

Сучасні дослідження в галузі точкових процесів пов'язані з розвитком комп'ютерних технологій і можливостей математичного моделювання. Використання стохастичного моделювання, аналізу часових рядів і методів машинного навчання дає змогу точніше описувати й передбачати поведінку точкових процесів у різних застосунках.

З розвитком обчислювальної техніки та доступності великих обсягів даних, теорія точкових процесів отримала новий імпульс розвитку. Було розроблено нові методи та алгоритми для аналізу та моделювання точкових процесів на великих даних, що дає змогу точніше й ефективніше вивчати їхні властивості та взаємодію.

Основні сучасні напрями та тенденції теорії.

1 Моделювання нестационарних процесів. Сучасні дослідження в галузі точкових процесів приділяють увагу моделюванню нестационарних процесів, де параметри процесу змінюються в часі. Це важливо для аналізу реальних систем, де інтенсивність подій може змінюватися залежно від зовнішніх факторів.

2 Застосування машинного навчання. З розвитком методів машинного навчання і штучного інтелекту, теорія точкових процесів знаходить нові можливості в аналізі даних і прогнозуванні майбутніх подій. Машинне навчання дає змогу поліпшити точність моделей і зробити прогнози більш релевантними для реальних ситуацій.

3 Застосування в біоінформатиці та медицині: Теорія точкових процесів стає дедалі більш затребуваною в галузі біоінформатики та медицини, де її застосовують для аналізу генетичних даних, розподілу захворюваності, аналізу медичних подій тощо. Це дає змогу виявляти зв'язки між подіями і передбачати ризики різних захворювань.

4 Інтеграція з іншими галузями. Сучасні дослідження також спрямовані на інтеграцію теорії точкових процесів з іншими галузями математики, статистики та інформатики. Це дає змогу отримувати нові знання і розробляти більш комплексні моделі та методи для аналізу різних процесів.

РОЗРОБКА СППР ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ФОРМУВАННЯ КОНТЕЙНЕРНИХ ПОЇЗДІВ

Технологія формування контейнерного поїзда є важливим етапом в організації інтермодальних перевезень. Вона містить у собі низку кроків і процесів, спрямованих на ефективне складання та компоновання контейнерів для подальшого доставлення на судно-контейнеровоз.

Одним із основних етапів технології формування контейнерного поїзда є сортування та групування контейнерів відповідно до їхнього призначення та кінцевого пункту призначення. Це дає змогу оптимізувати навантаження і розміщення контейнерів у поїзді, знизити ризик пошкодження вантажу і забезпечити оптимальне використання місткості поїзда.

Іншим важливим етапом є визначення порядку розміщення контейнерів у вагонах. Це охоплює врахування вимог до стабільності вантажу, вагових обмежень і необхідності забезпечення доступу до певних контейнерів у процесі розвантаження. Технологія формування контейнерного поїзда також може містити оптимізацію розподілу контейнерів по вагонах з метою балансування навантаження і підвищення стабільності руху поїзда.

Важливим аспектом технології формування контейнерного поїзда є використання відповідного обладнання та інструментів, як-от

навантажувальні крани, платформи для розміщення контейнерів і системи автоматичного управління. Це дає змогу прискорити процес складання поїзда, знизити ручну працю і підвищити безпеку операцій.

Остаточний етап технології формування контейнерного поїзда пов'язаний з перевіркою і контролем якості компонування контейнерів. Це охоплює перевірку правильності розміщення контейнерів, фіксацію вантажів і перевірку відповідності всім вимогам безпеки і транспортних правил.

Технологія формування контейнерного поїзда відіграє важливу роль у забезпеченні ефективності та надійності інтермодальних перевезень. Вона дає змогу оптимізувати використання залізничного транспорту, знизити час перевезення і поліпшити якість обслуговування клієнтів.

Формування контейнерних поїздів для відправлення в порт може залежати від різних чинників, включно з параметрами потоку прибуття контейнерів на станцію формування поїзда. Якщо цей потік є випадковим, то це означає, що надходження контейнерів на станцію може бути непередбачуваним і мінливим. Урахування випадковості в таких процесах може бути важливим для оптимізації та планування роботи станції та ефективного формування поїздів.

Формування контейнерних поїздів для відправлення в порт є складним процесом, у якому важливу роль відіграють параметри потоку прибуття контейнерів на станцію формування поїзда. Досліджується вплив випадкового потоку прибуття контейнерів на формування поїздів та його наслідки для ефективності перевезень і оперативності доставлення вантажів у порт. Використовується математична модель і статистичний аналіз даних для вивчення випадкових факторів та їхнього впливу на процес формування поїздів. Результати показують, що випадковий потік прибуття контейнерів може значно впливати на час і обсяг формування поїздів, а також на загальну ефективність перевезень і доставлення

вантажів у порт. Ця обставина підкреслює важливість урахування випадковості та розроблення оптимальних стратегій планування та управління формуванням контейнерних поїздів з метою забезпечення більш ефективного та оперативного транспортування вантажів.

Формування контейнерних поїздів для доставлення вантажів у порт є ключовим етапом у логістичному ланцюзі інтермодальних перевезень. Цей процес охоплює збір, сортування та організацію контейнерів для подальшого відправлення на судно-контейнеровоз. Однак у реальних умовах, потік прибуття контейнерів на станцію формування поїзда може бути випадковим і схильним до змін залежно від різних чинників, як-от погодні умови, митні процедури, операційні затримки тощо. У зв'язку з цим, важливо дослідити вплив випадкового потоку прибуття контейнерів на процес формування поїздів і розробити ефективні стратегії планування та управління, щоб забезпечити своєчасне доставлення вантажів у порт.

Для вивчення впливу випадкового потоку прибуття контейнерів на формування поїздів використовується математична модель, заснована на теорії випадкових процесів. Вона дає змогу врахувати ймовірнісні характеристики потоку прибуття контейнерів, такі як середнє значення, дисперсія, функція розподілу тощо. Дані про потік прибуття контейнерів на станцію формування поїзда збираються й аналізуються з використанням статистичних методів, включно з кореляційним аналізом і регресійними моделями. Це дає змогу оцінити ступінь взаємозв'язку між випадковими факторами і процесом формування поїздів.

Вплив на формування поїздів і доставлення вантажів у порт.

Результати дослідження показують, що випадковий потік прибуття контейнерів на станцію формування поїзда має значний вплив на процес формування поїздів і доставлення вантажів у порт. Варіації в потоці прибуття контейнерів можуть призводити до неоднорідності та невизначеності в часі та обсязі формування поїздів. Це може призводити

до затримок, збільшення часу оброблення вантажів і неефективного використання ресурсів. Отже, розроблення оптимальних стратегій планування та управління формуванням поїздів, що враховують випадковий потік прибуття контейнерів, є важливим завданням для забезпечення ефективнішого та оперативнішого доставлення вантажів у порт.

Отже, важливим моментом є те, що модель управління формуванням і просуванням контейнерних поїздів в рамках інтермодальних перевезень має врахувати випадковість потоків надходження контейнерів на станцію формування поїзда.

У сучасному світовому економічному контексті контейнерні перевезення відіграють вирішальну роль у глобальній логістиці, забезпечуючи ефективно і швидко доставлення вантажів по всьому світу. Обсяги контейнерних перевезень продовжують стрімко зростати, відображаючи 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 сектора.

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 доставлення контейнерів на судно-контейнеровоз. Оптимізація цієї взаємодії є необхідною умовою для забезпечення більш ефективних і надійних інтермодальних перевезень.

Співпраця та координація між залізничними та морськими перевізниками, портовими операторами та логістичними компаніями стають ключовими факторами для успішної реалізації інтермодальних

перевезень. Оптимальне планування і синхронізація графіків руху поїздів і суден, точне визначення часу навантаження і розвантаження контейнерів, а також ефективне використання інфраструктури портів і залізничних терміналів – все це є невід'ємною частиною оптимізації процесу взаємодії між залізничним і морським транспортом.

У сучасних інтермодальних перевезеннях між континентами ефективна організація транспортування контейнерів від їхнього відправлення зі складів до фінального доставлення 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 для підвищення операційної ефективності в ланцюжку поставок.

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

Процес взаємодії залізничного і морського транспорту починається не у момент надходження поїзда до терміналу і навіть не в момент його відправлення залізничною лінією в напрямку порту. Цей процес починається 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 чинників, що і обумовлює його складну імовірнісну природу.

Метою практичних і лабораторних робіт є реалізація моделі управління процесами формування контейнерних поїздів та подолання залізничної ділянки шляху для забезпечення своєчасного доставлення контейнерів на судно в ході здійснення інтермодальних перевезень.

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. Залізничний транспорт також надає стійкішу і надійнішу альтернативу автомобільному транспорту, 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 своєчасне і ефективне доставлення контейнерів до кінцевого пункту призначення.

Однією з ключових проблем у цьому процесі є необхідність управління великою кількістю контейнерів, що зазвичай задіяні в операціях з контейнерних перевезень. Для подолання цієї проблеми багато судноплавних компаній використовують спеціалізовані програмні системи, що 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. Ці поїзди 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, що призначені 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 доставлення «останньої милі».

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

Можливість відправлення неповних контейнерних поїздів є важливим моментом в логістиці контейнерних перевезень. Загалом судноплавні компанії прагнуть мінімізувати затримки в доставленні контейнерів до порту, оскільки затримки можуть 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 чекаючи, поки всі контейнери будуть зібрані.

Рішення про відправлення неповного контейнерного поїзда буде залежати від ряду факторів, включаючи обсяг контейнерів, що необхідно перевезти, відстань до порту і наявність 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 і транспортні ресурси легко доступні.

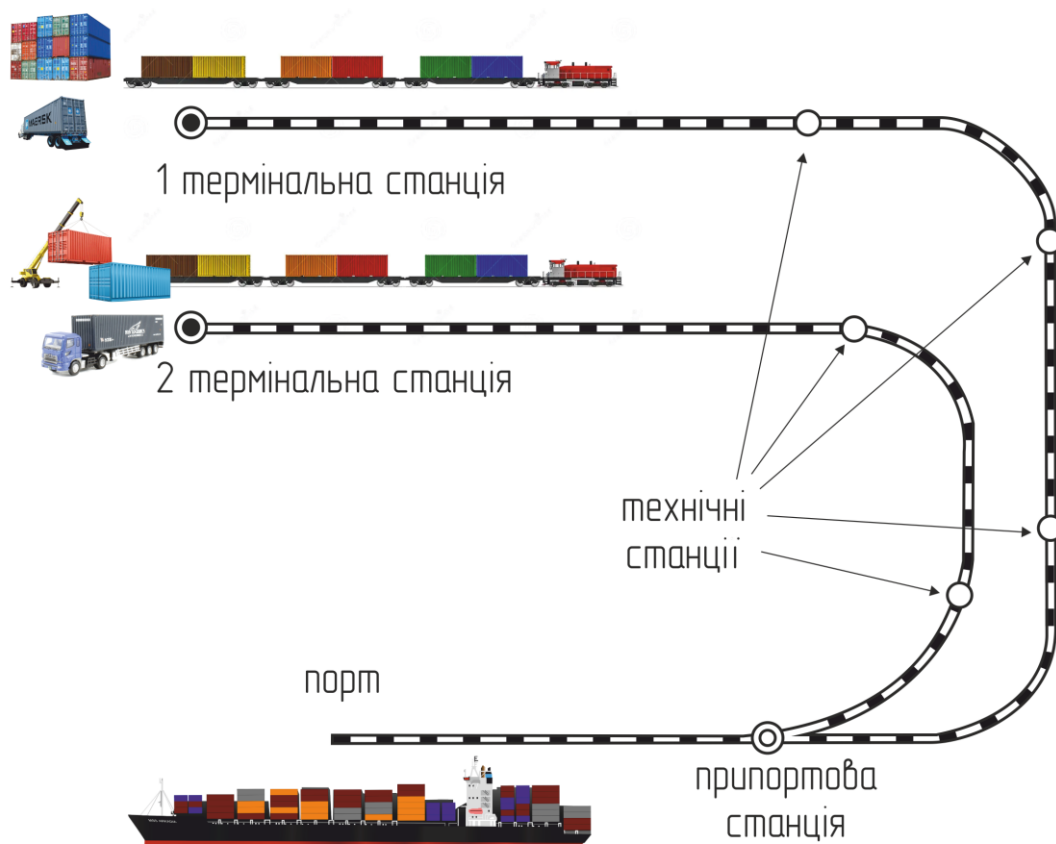


Рисунок 1 – Схема доставлення контейнерних партій до порту з використанням залізничного транспорту

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 своєчасне доставлення 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, які є особливо чутливими до часу або цінними, 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, це не завжди може бути найбільш практичним або ефективним підходом, 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 номінальною 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, тоді функція залежності витрат контейнеродин від часу в процесі накопичення контейнерної партії може бути визначена як інтеграл від добутку функції інтенсивності та змінної часу [8]:

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

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.

Формула (1) містить інтеграл зі змінною верхньою межею.

Функція умовної інтенсивності є поняттям, що застосовується в 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 та їхніх транспортних відділів, наявністю автомобільного транспорту та водіїв для здійснення перевезення, заторами на дорогах тощо. Під нестационарністю випадкових потоків розуміється мінливість у часі їхніх характеристик, в першу чергу їхньої інтенсивності.

На відміну від звичайної функції інтенсивності, що 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 умови певної передісторії та подій. Отже, функція умовної інтенсивності надає інформацію про ймовірність настання події, враховуючи події, що вже відбулися, і контекст, у якому вони відбуваються. Так, 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 умови певної передісторії та подій, що відбуваються на станції. Вона визначає ймовірність появи нового контейнера в зазначений момент часу або інтервал часу, з огляду на вже присутні контейнери, 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 огляду на динаміку формування поїзда і вплив зовнішніх чинників на цей процес.

Отож, 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 у минулому, тобто ця функція безпосередньо залежить від історичних даних процесу [9]. До того ж, вона фактично є функцією ризику (англ. hazard function) [10]. Отже, з одного боку часовий точковий процес (англ. temporary point process, TRP) – це розподіл імовірностей над послідовністю подій змінної довжини в безперервному часі. З іншого боку часовий точковий процес можна розглядати як модель авторегресії. Водночас часовий точковий процес є також і лічильним процесом, тобто процесом підрахунку кількості випадкових подій. Функція умовної інтенсивності дає змогу поєднувати ці точки зору і моделювати точкові процеси, що мають різну природу та відповідну до неї поведінку. Для вирішення поточної задачі згідно з поставленою метою пропонується отримувати функції умовної інтенсивності шляхом генерації з використанням прогнозної моделі на основі нейронної мережі, так вона буде враховувати історичні дані. Однак фактично функція умовної інтенсивності часового точкового процесу є тією ж самою функцією інтенсивності випадкового потоку за термінологією так званої теорії випадкових потоків, яка більш відома в науковому та освітньому середовищі країн Східної Європи та СНД. Однак саме теорія точкових процесів є більш загальною та і фактично є єдиним стандартним і загальноприйнятим у науковому світі підходом, що застосовується при дослідженні.

Тоді першу складову експлуатаційних витрат можна записати у такий спосіб:

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

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

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

t_i – момент часу завершення процесу накопичення контейнерної партії на i -ій термінальній станції;

$c_i^{к·хв}$ – вартість контейнеро-хвилини простою контейнера на i -ій термінальній станції, що може включати вартість хвилини використання контейнера, вартість перебування контейнера на контейнерному майданчику станції або платформі та його охорону 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 урахування додаткових витрат у разі відправлення неповносоставних поїздів, бо в такому випадку собівартість транспортування цієї партії контейнерів зростає та відповідно зростає питома собівартість транспортування контейнера для залізничної компанії. Цей 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. Отже, додаткові витрати виникають в обсязі вартості перевезень контейнерів у кількості, що дорівнює різниці між нормативною кількістю у складі поїзда і фактичною кількістю:

$$C_2 = \sum_{i=1}^{N^{мер}} \left(\left(m_i - \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt \right) \left(m_i > \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt \right) \frac{C_i^{kn}}{m_i} \right), \quad (3)$$

де m_i – норма кількості фітингових платформ відповідної кількості контейнерів у перерахунку на сорокафутові контейнери (FEU) у складі контейнерного поїзда, що формується на i -ій термінальній станції;

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

Як було зазначено вище, контейнерні перевезення і особливо інтермодальні, у яких одночасно приймають участь декілька незалежних транспортних операторів та 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 та відповідної кількості фітингових платформ, яка обумовлена максимальною умовною довжиною колій на попутних станціях, максимальною вагою поїзда, що обумовлена потужністю локомотива тощо. Отже, склад контейнерного поїзда може за чисельністю вагонів перевищувати нормативне значення, однак знаходитись у межах граничних показників. У такому разі можуть

виникати додаткові витрати, пов'язані з необхідністю проведення додаткових маневрових робіт при формуванні поїзда. Однак в першу чергу проведення додаткових маневрових робіт в цьому випадку виникає в процесі розвантаження поїзда у порту, адже колії припортової станції, що 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 їх розчеплення з послідовним подаванням частин на портову колію для розвантаження. Отже, ці додаткові витрати необхідно врахувати так:

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

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

Як було зазначено вище, у разі, якщо фактична кількість пред'явлених контейнерів виявиться меншою ніж кількість, що була 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 їх небажанням втрачати прибутки та відповідним стимулюванням інтермодальних операторів до запобігання порожнього пробігу контейнеромісць, особливо на тлі кардинального підвищення тарифів на контейнерні перевезення у світі. Так, наприклад, всесвітньо відомий морський перевізник – компанія MSC (Mediterranean Shipping Company) запровадила штраф за неподання контейнера до перевезення «no show bookings surcharge», який становить \$600 за 1 FEU. Отже, необхідно включити до цільової функції елемент, що буде враховувати ці витрати:

$$C_4 = c^{шн} \left(n^{фр} - \sum_{i=1}^{N^{мep}} \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt \right), \quad (5)$$

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

$c^{шн}$ – сума штрафу за один FEU, що не був пред'явлений для навантаження на судно.

Поняття ризику, що застосовується у технічній, економічній та фінансовій сферах, передбачає можливість здійснення не лише якісної, але насамперед кількісної оцінки ризику. Величина ризику вимірюється зазвичай у грошовому еквіваленті і може бути обчислена як добуток ймовірності небажаної події та величини матеріального збитку, що виникає внаслідок настання цієї події:

$$R = Q \cdot c^{зб}, \quad (6)$$

де Q – ймовірність настання небажаної події;

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

Організація формування та доставлення контейнерних партій до порту не виключає можливості несвоєчасного прибуття хоча б одного з контейнерних поїздів, що так само призведе до затримки судна з вини залізничного перевізника та накладання портом відповідних штрафних санкцій. Ця можливість несвоєчасного прибуття поїздів до порту є наслідком впливу багатьох факторів, велика частка яких знаходиться поза межами контролю залізничного оператора, або цей контроль є лише частковим і не дає змоги повністю виключити можливість настання цієї

небажаної події. До того ж імовірність запізнення контейнерного поїзда безпосередньо залежить від управлінських рішень, пов'язаних з процесом накопичення контейнерних партій на термінальних залізничних станціях. Час на просування поїзда від термінальної залізничної станції до порту має вкластися у часовий проміжок між моментом завершення накопичення контейнерної партії на термінальній станції і моментом відправлення судна, враховуючи також тривалість навантаження. Враховуючи той факт, що перевезення здійснюється маршрутним поїздом, то на перший погляд видається раціональним рішенням прийняти цей час просування за сталу величину, що залежить від довжини маршруту, або принаймні моделювати його випадковою величиною, що має незначні коливання, використовуючи нормальний закон розподілу. Однак такий підхід був би можливим лише в умовах розвинених європейських країн, наприклад, якщо контейнери перевозяться поїздом типу *shuttle train*, тобто залізничним контейнерним експресом, що прямує практично без зупинок і практично 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 тієї ж інфраструктури, до того ж пасажирські поїзди мають вищий пріоритет. Такий суміщений рух в купі з високою вантажонапруженістю ліній призводить до швидкого зносу рейок і виходу з ладу елементів верхньої будови колії, частої необхідності виділення вікон для здійснення планових та позапланових ремонтів. Довжина ліній, на яких діють попередження про необхідність обмеження швидкості руху поїздів, пов'язані або зі станом колій або з проведенням ремонтних робіт, становить в середньому більше половини від загальної протяжності ліній залізничної системи України. До того ж рух переважної більшості вантажних поїздів здійснюється не за сталим розкладом, а за готовністю і за 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 та 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. Отже, в 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 випадкової величини безперервного типу. Запізнення поїзда відбудеться у разі перевищення часу його 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 і тоді її можна обчислити у такий спосіб:

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

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

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

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

T^c – момент часу відбуття судна згідно з графіком його руху;

$P\{\tau^{np} \leq (T^c - \tau^{нав} - t)\}$ та $Q\{\tau^{np} > (T^c - \tau^{нав} - t)\}$ – імовірність того, що час просування поїзда не перевищить тривалості часового вікна, що обмежене моментом часу закінчення накопичення контейнерної партії та моментом часу відправлення контейнеровоза за його розкладом з урахуванням часу на навантаження, тобто ймовірність вчасного прибуття поїзда до порту та, відповідно, його запізнення як функцій 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-контейнеровоза з причини запізнення прибуття контейнерного поїзда до порту можна визначити:

$$Q\{\tau^{np} > (T^c - \tau^{нав} - t)\} = 1 - \frac{\gamma(\lambda \cdot (T^c - \tau^{нав} - t))}{\Gamma(k)} = 1 - \frac{\gamma(\lambda \cdot (T^c - \tau^{нав} - t))}{(k-1)!} =$$

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

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

Перехід від гамма-функції $\Gamma(k)$ до факторіалу $(k-1)!$ був здійснений завдяки тому, що $k \in \mathbb{Z}^+$, тобто параметр k належить до множини додатних цілих чисел.

На рисунку 2 наведено механізм визначення імовірності запізнення контейнерного поїзда у разі розподілу величини тривалості часу перевезення, за законом Ерланга, за допомогою кумулятивної функції розподілу цього закону.

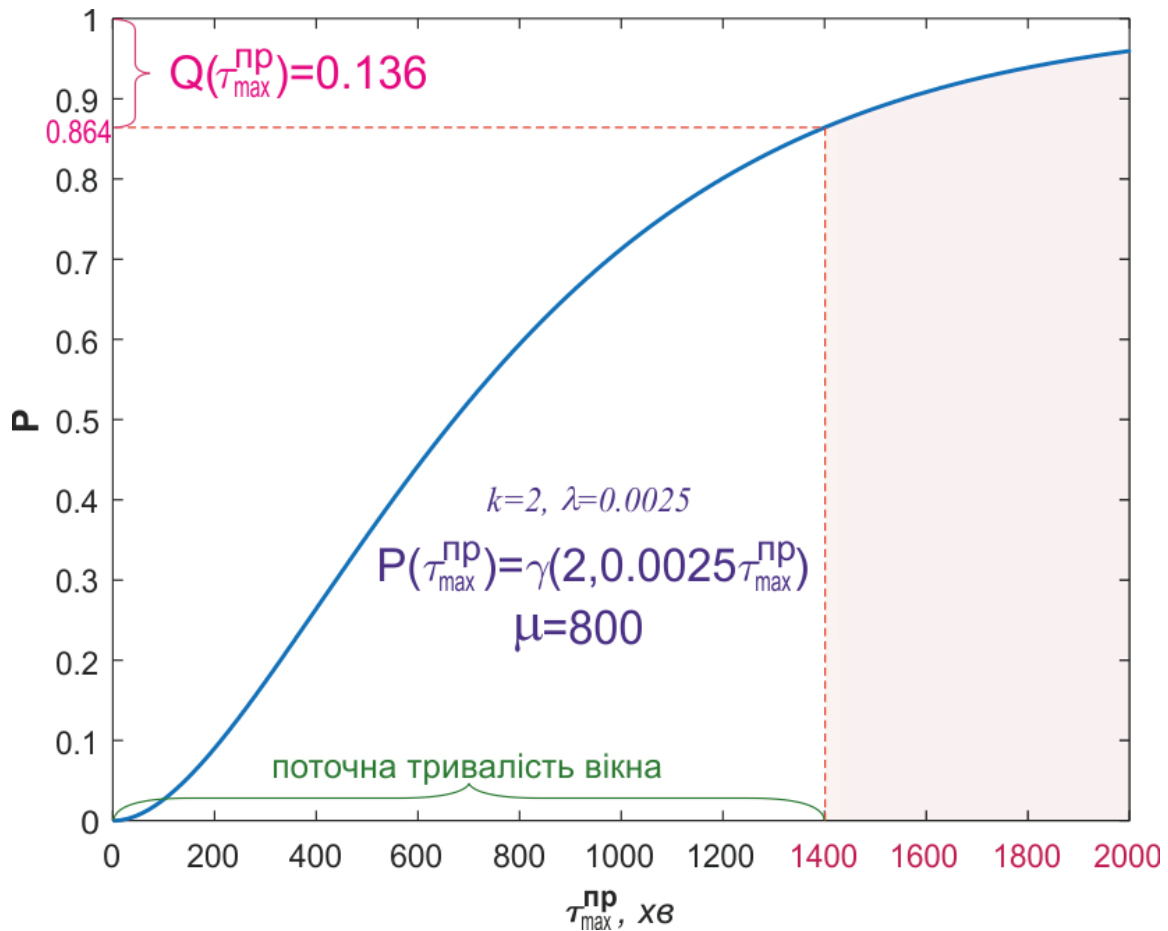


Рисунок 2 – Визначення імовірності запізнення контейнерного поїзда у разі розподілу величини тривалості часу перевезення, за законом Ерланга, за допомогою кумулятивної функції розподілу цього закону

На рисунку 3 наведено схему визначення імовірностей затримки судна внаслідок запізнень контейнерних поїздів, що потрібна для визначення сумарної функції ризику, адже фактично штрафна функція є дискретною, оскільки затримка, наприклад, на 15 хвилин від наступної години все одно призводить до штрафної виплати за цілу годину.

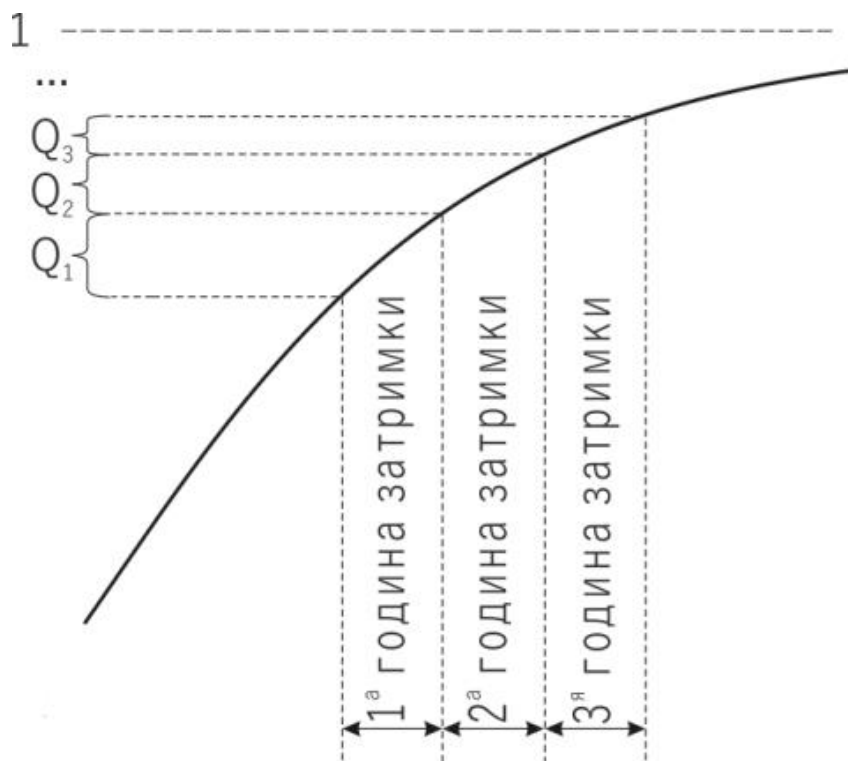


Рисунок 3 – Визначення погодинних імовірностей затримки судна внаслідок запізнень контейнерних поїздів

Однак у разі одночасного накопичення контейнерних партій на декількох термінальних станціях та відповідно відправлення з кожної цієї станції маршрутного контейнерного поїзда у бік порту імовірність затримки судна дорівнює імовірності випадку, коли хоча б один з цих поїздів прибуде до порту з запізненням. Отже, враховуючи те, що запізнення кожного окремого поїзда є незалежною подією та в той же час ці події є сумісними, тобто не виключається той факт, що вони можуть відбутися разом, імовірність випадку, коли щонайменше один поїзд прибуде з запізненням, згідно з теоремою про додавання імовірностей для сумісних подій, дорівнюватиме сумі імовірностей запізнень кожного окремого поїзда.

Імовірність затримки судна можна розрахувати так:

$$Q^{3c} = \sum_{i=1}^{N_{мер}} \sum_{j=1}^{k_i} \frac{e^{-\lambda_i \cdot (T^c - \tau^{наб} - t_i)} \left(\lambda_i \cdot (T^c - \tau^{наб} - t_i) \right)^j}{j!}, \quad (9)$$

де k_i та λ_i – відповідно параметр ступеня (або форми) та параметр інтенсивності закону розподілу Ерланга [9], якому підпорядковується величина тривалості маршруту контейнерного поїзда, що прямує від i -ої термінальної станції до порту.

Тоді наступну складову цільової функції, яка представляє ризик затримки судна-контейнеровоза з провини залізничного оператора, можна записати:

$$C_5 = R = Q^{3c} c^{3c} = c^{3c} \sum_{i=1}^{N_{мер}} \sum_{j=1}^{k_i} \frac{e^{-\lambda_i \cdot (T^c - \tau^{наб} - t_i)} \left(\lambda_i \cdot (T^c - \tau^{наб} - t_i) \right)^j}{j!}, \quad (10)$$

де c^{3c} – вартість години затримки судна;

$\tau^{наб}$ – планова тривалість навантаження судна.

Цільову функцію можна представити:

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

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 представляють потоки надходження контейнерів;

$\{\theta_1, \theta_2 \dots \theta_n\}$ – множина розподілів тривалостей просування контейнерних поїздів (представлених відповідними параметрами) між відповідними термінальними залізничними станціями і портом.

Обсяг накопиченої партії контейнерів на кожній з термінальних залізничних станцій на моменти часу, що будуть визначені за допомогою моделі як моменти закінчення формування контейнерних поїздів, можна визначити за формулою [8]:

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

Також необхідно врахувати обмеження, що накладаються на керуючі змінні технологічним процесом. Так, наприклад, необхідно врахувати обмеження по максимальній довжині поїздів, що формуються, у фізичних вагонах (фітінгових платформ):

$$\int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt \leq m_i^{\max}, \quad i = 1 \dots N^{мер}, \quad (13)$$

де m_i^{\max} – максимально можлива довжина поїзда на напрямку від i -ої термінальної залізничної станції до порту.

ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

У таблиці 1 наведено вихідні дані для розрахунку.

Таблиця 1 – Вихідні дані до прикладу розрахунку

Найменування	Значення	Од. вим.
1	2	3
Прогнозна умовна інтенсивність $\lambda_1^*(t)$ нестационарного пуасонівського процесу надходження контейнерів (у перерахунку на TEU) до першої термінальної станції	$8.2019 \cdot 10^{-27}t^8 - 4.869 \cdot 10^{-24}t^7 - 4.7899 \cdot 10^{-19}t^6 + 2.519 \cdot 10^{-15}t^5 - 5.0406 \cdot 10^{-12}t^4 + 4.0412 \cdot 10^{-9}t^3 - 7.2505 \cdot 10^{-7}t^2 - 0.0001538t + 0.10832$	FEU/хв
Прогнозна умовна інтенсивність $\lambda_2^*(t)$ нестационарного пуасонівського процесу надходження контейнерів (у перерахунку на TEU) до другої термінальної станції	$5.5929 \cdot 10^{-26}t^8 - 7.8894 \cdot 10^{-22}t^7 + 4.6203 \cdot 10^{-18}t^6 - 1.441 \cdot 10^{-14}t^5 + 2.5387 \cdot 10^{-11}t^4 - 2.4372 \cdot 10^{-8}t^3 + 1.0803 \cdot 10^{-5}t^2 - 0.0012039t + 0.09046$	FEU/хв
Вартість спорядження та просування контейнерного поїзда від першої термінальної станції до порту	4000	\$
Вартість спорядження та просування контейнерного поїзда від другої термінальної станції до порту	5500	\$
Параметри форми і масштабу тривалості просування контейнерного поїзда від першої термінальної станції до порту як випадкової величини, що розподілена 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, що розподілена за законом Ерланга	$k_2 = 2, \mu_2 = 500$	од, хв

Продовження таблиці 1

1	2	3
Додаткові витрати при перевищені норми кількості фітингових платформ у складі контейнерного поїзда на одну одиницю (на обох напрямках)	200	\$
Кількість заброньованих на судні контейнеромісць в перерахунку на FEU	73	FEU
Момент часу закінчення навантаження судна і його відплиття у хвилинах від моменту початку планового розрахункового періоду у хвилинах	1600	хв
Тривалість навантаження одного контейнера	5	хв/FEU
Штраф за неперед'явлення до навантаження на судно 1 FEU	600	\$/FEU
Вартість години затримки судна	5000	\$/год
Норма довжини контейнерних поїздів у фізичних вагонах (фітингових платформах)	$m_1 = 50, m_2 = 50$	ваг
Максимально можлива довжина контейнерних поїздів на напрямках від термінальних залізничних станції до порту	$m_1^{\max} = 65, m_2^{\max} = 65$	ваг

На рисунку 4 надані графічні представлення функцій умовної інтенсивності випадкових потоків надходження контейнерів до термінальних станцій, наведених в таблиці 1.

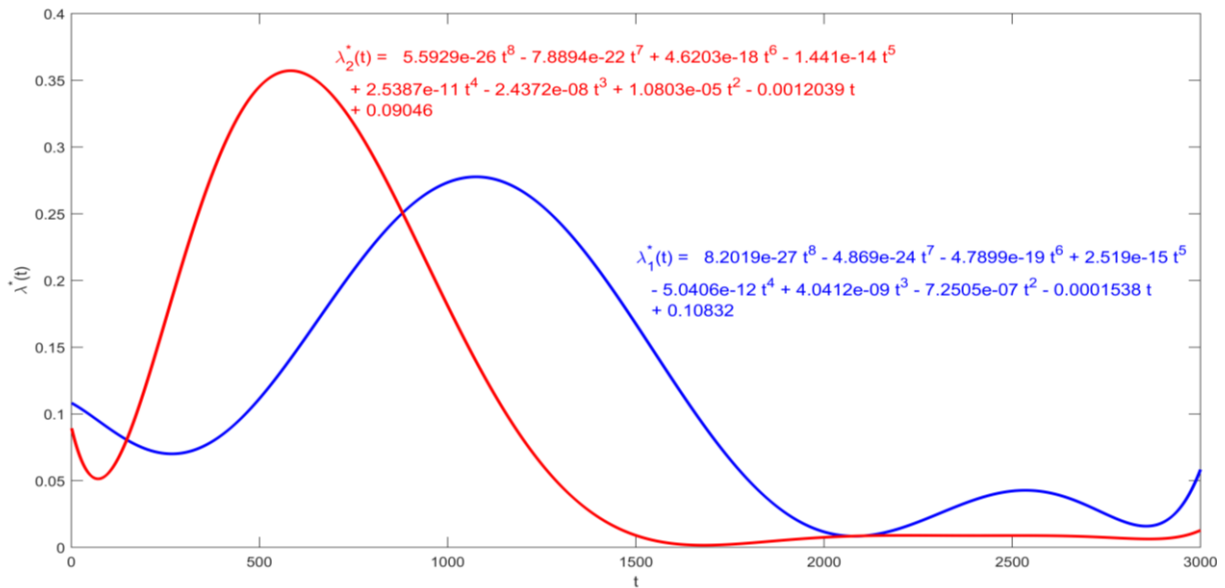


Рисунок 4 – Функції умовної інтенсивності випадкових потоків надходження контейнерів

На рисунку 5 наведено графічне представлення цільової функції 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 буде неможливо представити 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.

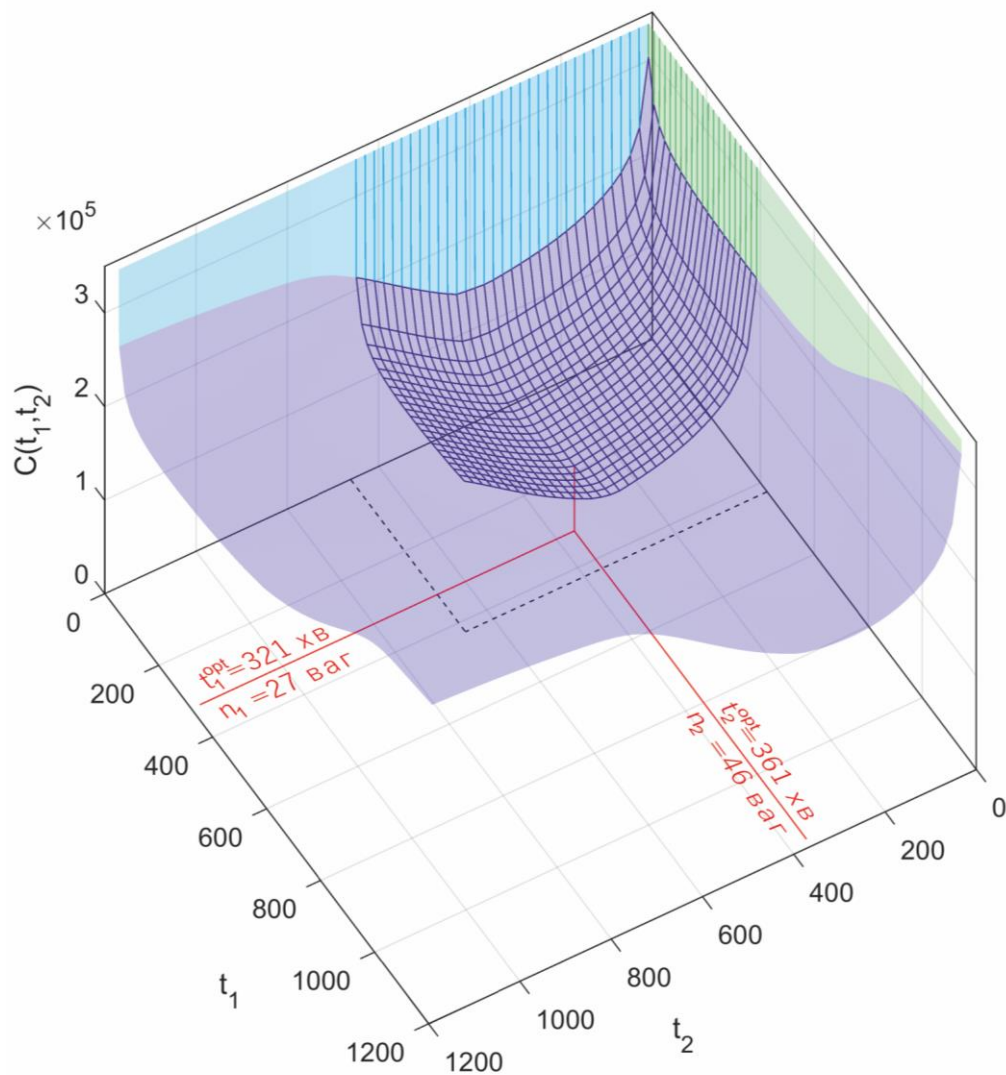
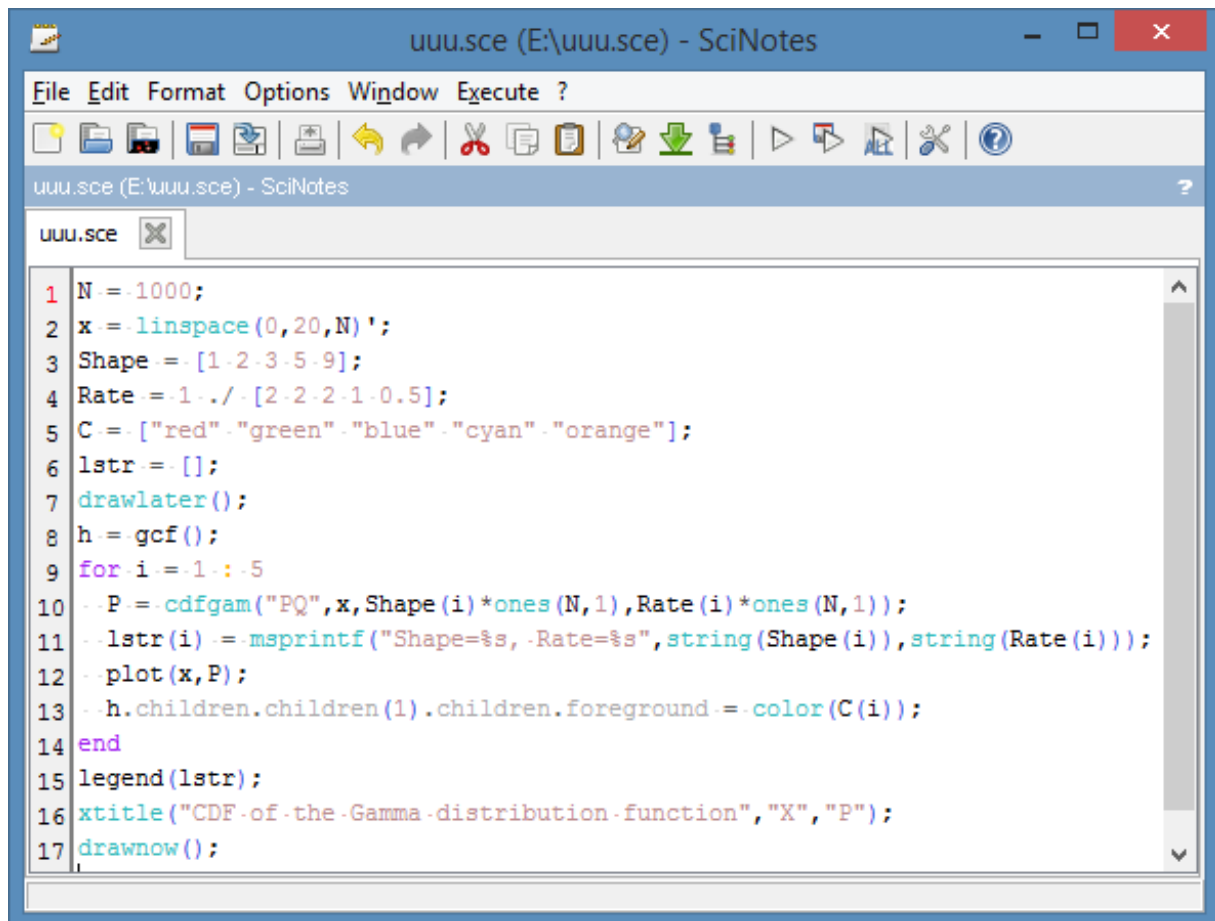


Рисунок 5 – Цільова функції моделі та результат її оптимізації

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

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИБОРУ ІНСТРУМЕНТУ РЕАЛІЗАЦІЇ МОДЕЛІ

Для реалізації даної моделі існує багато шляхів. Одним із можливих шляхів є використання табличних процесорів, наприклад, Microsoft Excel. Однак найбільш зручний і ефективний спосіб застосування Microsoft Excel є такий, що дає змогу максимально використати його можливості. Тобто цей шлях передбачає використання вбудованої в продукти Microsoft Office мови програмування Visual Basic for Applications (VBA). Однак доцільніше використовувати системи комп'ютерної алгебри, які до того ж містять у своєму складі статистичні тулбокси, як наприклад Matlab або Scilab. Мова програмування Python також є потужним інструментом для реалізації даної моделі, адже вона містить бібліотеки як для символічних так і для статистичних обчислень. Однак використання систем Matlab або Scilab є більш доцільним і зручним. На рисунках 6 та 7 наведені код програми мовою Scilab та результат його виконання відповідно. Цей код призначений для генерування кумулятивних функцій розподілів Ерланга з різними параметрами.



The image shows a screenshot of the SciNotes application window. The title bar reads "uuu.sce (E:\uuu.sce) - SciNotes". The menu bar includes "File", "Edit", "Format", "Options", "Window", and "Execute?". The toolbar contains various icons for file operations and execution. The main text area displays the following MATLAB code:

```
1 N = -1000;  
2 x = linspace(0, 20, N)';  
3 Shape = [1 2 3 5 9];  
4 Rate = 1 ./ [2 2 2 1 0.5];  
5 C = ["red" "green" "blue" "cyan" "orange"];  
6 lstr = [];  
7 drawlater();  
8 h = gcf();  
9 for i = 1 : 5  
10     P = cdfgam("PQ", x, Shape(i) * ones(N, 1), Rate(i) * ones(N, 1));  
11     lstr(i) = sprintf("Shape=%s, Rate=%s", string(Shape(i)), string(Rate(i)));  
12     plot(x, P);  
13     h.children.children(1).children.foreground = color(C(i));  
14 end  
15 legend(lstr);  
16 xtitle("CDF of the Gamma distribution function", "X", "P");  
17 drawnow();
```

Рисунок 6 – Код програми мовою Scilab

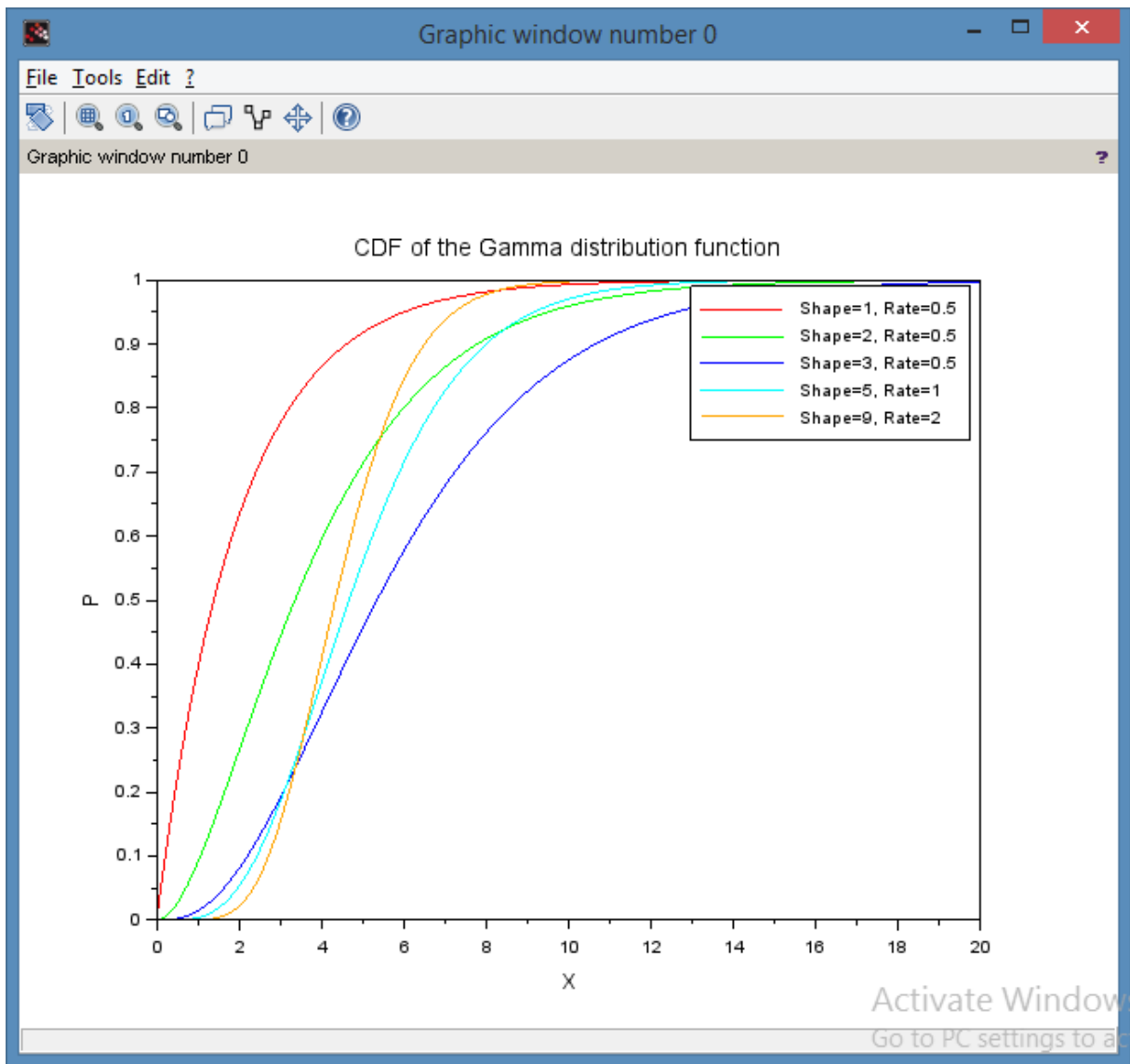


Рисунок 7 – Кумулятивні функції (CDF) розподілів Ерланга з різними параметрами

ВИХІДНІ ДАНІ

Вихідні дані для 30 варіантів завдання наведені в таблиці 2. Номер варіанта обирається відповідно до номера здобувача за списком групи або безпосередньо вказується викладачем. Таблиця 2 містить всі необхідні дані для реалізації моделі, окрім функцій умовної інтенсивності λ_1^* та λ_2^* . У графах таблиці 2, що відповідають цим функціям, наведені номери, за якими потрібно обрати аналітичні записи даних функцій, які наведені у таблиці 3.

Таблиця 2 – Вихідні дані до розрахунку за варіантами

$n^{фр}$	Показник	Номер варіанта																															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
		Значення																															
	λ_1^*	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5	5	
	λ_2^*	2	3	4	5	6	7	8	9	3	4	5	6	7	8	9	4	5	6	7	8	9	5	6	7	8	9	6	7	8	9		
	$c^{кп_1}$	4000	4100	4200	4300	4400	4500	4600	4700	4800	4900	5000	5100	5200	5300	4050	4730	4050	4150	4250	4350	4450	4550	4650	4750	4850	4950	5050	5150	5250	5350	5070	5120
	$c^{кп_2}$	5320	5270	5160	5040	4920	4830	4770	4690	4530	4460	4350	4240	4180	4050	4730	5030	5180	4270	4920	5220	5010	4280	4690	5120	5270	4580	4610	4290	5090	4630		
	k_1	2	2	2	3	2	2	3	2	3	3	2	3	3	2	2	2	2	3	3	2	3	3	3	3	2	2	3	2	2	2	2	
	μ_1	400	410	420	430	440	450	460	470	480	480	490	500	510	520	405	415	425	435	445	455	465	475	485	495	505	515	525	413	428	469		
	k_2	3	2	3	2	2	2	3	3	3	2	3	2	2	2	3	2	3	3	2	3	2	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	
	μ_2	515	520	535	550	490	530	486	427	478	464	511	485	524	473	518	424	467	492	513	468	481	459	482	437	485	500	400	505	407	439		
	$c^{об_1}$	200	190	180	185	195	205	225	215	235	230	227	244	213	167	198	178	254	265	243	170	177	194	212	234	258	161	175	269	180			
	$c^{об_2}$	198	239	189	263	228	215	176	188	193	218	229	212	174	196	255	239	270	231	163	130	166	207	164	238	214	172	199	233	244			

Продовження таблиці 2

Показник		Номер варіанта																													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
		Значення																													
m_{max_2}	m_{max_1}	m_2	m_1	C^{Kx6_2}	C^{Kx6_1}	C^{3C}	C_{min}	$\tau_{дав}$	T^c																						
0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,1	5010	550	6	1650																						
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	5100	560	5	1610																						
0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,11	5200	570	7	1620																						
0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,15	5300	580	8	1630																						
0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,22	5400	590	7	1640																						
0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,17	5600	600	5	1650																						
0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,19	5700	540	5	1660																						
0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,17	5800	530	5,5	1670																						
0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,22	5900	520	6,5	1605																						
0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	6000	510	7,5	1615																						
0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,13	5050	500	8	1625																						
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,17	5150	490	7,7	1635																						
0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,19	5250	480	7	1645																						
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,15	5350	470	7,5	1655																						
0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,13	5450	460	6,5	1665																						
0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	5550	450	6	1607																						
0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,16	5650	400	5,5	1618																						
0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	5750	420	5	1623																						
0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,19	5850	600	6	1634																						
0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,16	5950	610	6,5	1642																						
0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,14	6050	430	7	1654																						
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	6100	425	7,5	1668																						
0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,13	5030	445	8	1603																						
0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,19	5040	520	5	1614																						
0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,15	5060	620	5,5	1685																						
0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16	5070	435	6	1690																						
0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	5080	455	6,5	1695																						
0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,16	5090	465	7	1700																						
0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,16	5120	475	7,5	1705																						
0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,17	5140	485	8	1710																						

Таблиця 3 – Вихідні дані функцій умовної інтенсивності

№	Функція інтенсивності
1	$1.24e-26t^8 - 1.78e-22t^7 + 9.9e-19t^6 - 2.8e-15t^5 + 4.4e-12t^4 - 4.4e-9t^3 + 2.8e-06t^2 - 0.0009t + 0.2$
2	$1.62e-25t^8 - 1.7e-21t^7 + 7.6e-18t^6 - 1.6e-14t^5 + 1.75e-11t^4 - 7.5e-09t^3 - 5.5e-07t^2 + .001t + 0.026$
3	$-1.12e-26t^8 + 1.5e-22t^7 - 8.5e-19t^6 + 2.5e-15t^5 - 4.4e-12t^4 + 4.4e-09t^3 - 2.3e-6t^2 + 0.0006t + 0.025$
4	$-9.5e-26t^8 + 1.2e-21t^7 - 6.17e-18t^6 + 1.6e-14t^5 - 2.4e-11t^4 + 1.8e-8t^3 - 7.4e-06t^2 + 0.0014t + 0.01$
5	$-2.26e-25t^8 + 2.8e-21t^7 - 1.37e-17t^6 + 3.5e-14t^5 - 4.9e-11t^4 + 3.7e-8t^3 - 1.37e-5t^2 + 0.002t + 0.01$
6	$-2.39e-25t^8 + 2.9e-21t^7 - 1.39e-17t^6 + 3.5e-14t^5 - 4.8e-11t^4 + 3.6e-8t^3 - 1.4e-05t^2 + 0.0025t + 0.01$
7	$1.62e-25t^8 - 1.78e-21t^7 + 7.68e-18t^6 - 1.64e-14t^5 + 1.75e-11t^4 - 7.6e-9t^3 - 5.57e-7t^2 + 0.001t + 0.027$
8	$-3.8e-25t^8 + 4.6e-21t^7 - 2.26e-17t^6 + 5.8e-14t^5 - 8.3e-11t^4 + 6.59e-8t^3 - 2.66e-5t^2 + 0.0045t$
9	$-1.5e-25t^8 + 1.77e-21t^7 - 8.4e-18t^6 + 2e-14t^5 - 2.8e-11t^4 + 2.05e-8t^3 - 7.4e-6t^2 + 0.0011t + 0.12$

У таблиці 4 також для зручності вказані номери формул, в яких зустрічаються величини, що використовуються при реалізації моделі та в кінцевих розрахунках в ході її оптимізації.

Таблиця 4 – Величини, що використовуються в кінцевих розрахунках

№	Позначка	Пояснення	Одиниця виміру	Де зустрічається (номер формули)
1	2	3	4	5
1	B	Величина контейнеро-годин (вагоно-годин), що витрачаються під час накопичення контейнерного поїзда	$конт \cdot год,$ $(ваг \cdot год)$	1
1	$\lambda_i^*(t)$	Функція умовної інтенсивності нестационарного випадкового потоку надходження контейнерів до i -ої термінальної станції. В таблиці 3 відповідно до варіанта надані номери, які є номерами, під якими надані функції λ_1^*, λ_2^* в таблиці 2	$\frac{конт}{хв}$	1,2,3,4,5
2	$C_i^{к.хв}$	Вартість контейнеро-хвилини простою на i -ій термінальній залізничній станції, що може включати вартість оренди місця на контейнерному майданчику, охорони тощо	$\frac{\$}{конт \cdot хв}$	2
3	$N^{тер}$	Кількість термінальних станцій формування контейнерних поїздів	станцій	2,3,4,5,9,10, 12,13
4	t_i	Момент часу завершення процесу накопичення контейнерної партії на i -ій термінальній станції	хв	2,7,8,9
5	$C_i^{кп}$	Вартість просування контейнерного поїзда, що відповідає нормативній кількості вагонів, від i -ої термінальної станції до порту	\$	3
6	$C^{дв}$	Питомі додаткові витрати, що припадають на кожен вагон, що причеплений до контейнерного поїзда поза нормою кількості вагонів	$\frac{\$}{ваг}$	4
7	$n^{фр}$	Кількість контейнеромісць, зафрахтованих оператором на контейнеровозі в перерахунку на FEU	конт, (FEU)	5
8	$C^{шн}$	Сума штрафу за один FEU, що не був пред'явлений для навантаження на судно	$\frac{\$}{конт}$	5
9	τ_0	Момент часу початку розрахункового (планового) періоду $\tau_0 = 0$ хв.	хв	1,2,3,4,5,12, 13
10	$C^{зс}$	Вартість години затримки судна	$\frac{\$}{год}$	10
11	$\tau^{нав}$	Планова тривалість навантаження судна	хв	7,8,9

Продовження таблиці 4

1	2	3	4	5
12	T^c	Момент часу закінчення навантаження судна	<i>хв</i>	7,8,9
13	n_i	Обсяг накопиченої партії контейнерів на кожній з термінальних залізничних станцій на моменти часу, що будуть визначені за допомогою моделі як моменти закінчення формування контейнерних поїздів	<i>конт</i>	12
14	k_i	Параметр ступеня (або форми) закону розподілу Ерланга, якому підпорядковується величина тривалості маршруту контейнерного поїзда, що прямує від i -ої термінальної станції до порту	<i>од</i>	8,9,10
15	λ_i	Параметр інтенсивності закону розподілу Ерланга, якому підпорядковується величина тривалості маршруту контейнерного поїзда, що прямує від i -ої термінальної станції до порту	$хв^{-1}$	8,9,10
16	m_i	Норма кількості фітінгових платформ і відповідної кількості контейнерів в перерахунку на сорокафутові контейнери (FEU) у складі контейнерного поїзда, що формується на i -ій термінальній станції	<i>ваг</i>	3
17	m_i^{\max}	Максимально можлива довжина поїзда на напрямку від i -ої термінальної залізничної станції до порту	<i>ваг</i>	13

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Daley, D. J., Vere-Jones, D. An Introduction to the Theory of Point Processes. Volume 1. Elementary Theory and Methods. Second edition : monograph. New York : Springer Verlag, 2003. 469 p.
2. Daley, D. J., Vere-Jones, D. An Introduction to the Theory of Point Processes. Volume 2. General Theory and Structure. Second edition : monograph. New York : Springer Verlag, 2008. 573 p.
3. Andersen P., Børgan O., Gill R., Keiding N. Statistical Models Based on Counting Processes. New York : Springer Verlag, 1993. 784 p.
4. Fishman P. M., Snyder D. The statistical analysis of space-time point processes. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1976. № 22. P. 257–274.
5. Palm C. Intensitätsschwankungen im Fernsprechverkehr. *Ericsson Technics*. 1943. №44. P. 1–189.
6. Daley D. J., Vere-Jones D. A summary of the theory of point processes. *Stochastic point processes: monograph* / ed. P. A. W. Lewis. John Wiley and Sons, New York. 1972. P. 299–383.
7. Preston C. J. Spatial birth-and-death processes. *Bulletin of the International Statistical Institute*. 1977. № 46. P. 371–391.
8. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М., Калашнікова Т. Ю., Шандер О. Е. Розробка СППР для управління процесом формування контейнерних поїздів в рамках системи інтермодальних перевезень. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 3.
9. 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.
10. 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.

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

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до практичних і лабораторних робіт

з дисципліни

*«СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В УПРАВЛІННІ
ЗАЛІЗНИЧНИМИ ПІДРОЗДІЛАМИ»*

Відповідальний за випуск Прохоров В. М.

Підписано до друку 18.10.2023 р.
Умовн. друк. арк. 3,0. Тираж . Замовлення № .
Видавець та виготовлювач Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха,7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.