

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет залізничного транспорту

ПАРХОМЕНКО ЛАРИСА ОЛЕКСІЇВНА



УДК 656.2.022:519.8

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ УПРАВЛІННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЮ РОБОТОЮ  
ЗАЛІЗНИЧНОЇ СИСТЕМИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ І РИЗИКІВ**

05.22.01 – транспортні системи

Реферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2025

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант** – доктор технічних наук, професор  
**Бутько Тетяна Василівна**,  
Український державний університет залізничного транспорту, кафедра управління експлуатаційною роботою, завідувач кафедри.

**Опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Жуковицький Ігор Володимирович**,  
Український державний університет науки і технологій, кафедра електронних обчислювальних машин, завідувач кафедри;

доктор технічних наук, професор  
**Кириченко Ганна Іванівна**,  
Державний університет інфраструктури та технологій, кафедра технологій транспорту та управління процесами перевезень, професор кафедри;

доктор технічних наук, професор  
**Коскіна Юлія Олексіївна**  
Одеський національний морський університет, кафедра експлуатації флоту і технологій морських перевезень, професор кафедри.

Захист відбудеться “27” березня 2025 р. об 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.04 в Українському державному університеті залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

Реферат розісланий “26” лютого 2025 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



А. В. Прохорченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Залізничний транспорт відіграє ключову роль у забезпеченні ефективних логістичних рішень як на національному так і на міжнародному рівнях. Проте, сучасні умови функціонування залізничних систем характеризуються високим рівнем невизначеностей та ризиків, що суттєво впливає на стабільність і ефективність їх експлуатації.

Ланка управління залізничного транспорту традиційно стикається з численними викликами, що виникають внаслідок непередбачуваності зовнішніх і внутрішніх факторів, які викликані окремими подіями, так і з тими, що є завжди присутніми і є наслідком стохастичної природи перевізного процесу. Однак у сучасних умовах рівень і чисельність цих викликів стрімко зростають внаслідок цілої низки причин. Такі фактори включають в себе варіативність попиту на перевезення, коливання параметрів транспортних потоків, технічні і оперативні збої, кліматичні зміни, бойові дії та інші непередбачувані обставини тощо.

Ці виклики ускладнюють ефективне планування і управління експлуатаційною діяльністю, що призводить до підвищення ризиків та витрат. В умовах зростаючих вимог до надійності та ефективності транспортних систем існує необхідність у розробці нових теоретичних і практичних підходів, які б дозволили зменшити вплив невизначеностей і ризиків на роботу залізничного транспорту.

Невизначеності в управлінні залізничними системами також часто пов'язані з недостатністю інформації, її неповнотою або зашумленістю, неефективними методами її обробки та прогнозування, людським фактором при прийнятті рішень тощо. Це додає додаткового рівня складності в забезпеченні надійного і ефективного функціонування залізничної транспортної системи. У зв'язку з цим сучасні підходи до управління невизначеностями такі як, наприклад, байєсовські моделі, нечітка логіка, м'які обчислення, нейронні мережі та інші інноваційні методи, стають все більш важливими і необхідними.

Сьогодні вже розроблено багато нових математичних теорій, моделей та методів, які хоча й не можуть повністю вирішити проблему невизначеностей, але теоретично здатні значно покращити управлінські механізми оперування цими факторами та протидії їх негативному впливу. Однак, застосування цих новітніх методів і математичних апаратів до теорії і практики управління залізничними системами є окремою проблемою, вирішення якої з одного боку передбачає вироблення загальних підходів, однак з іншого боку вимагає коректного урахування технологічних обмежень та специфіки управління окремими складовими транспортного процесу.

Зважаючи на вищевикладене, тема дисертації є актуальною, оскільки вона спрямована на розробку нових наукових основ управління експлуатаційною роботою залізничної системи в умовах невизначеностей і ризиків. Це дозволить підвищити ефективність перевезень, зменшити експлуатаційні витрати і забезпечити надійну доставку вантажів, що є важливим для економічного розвитку та конкурентоспроможності залізничного транспорту.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася відповідно до Національної транспортної стратегії України на

період до 2030 року, затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України (КМУ) від 07.04.2021 р. № 321-р, Регламенту (ЄС) 913/2010 Європейського Парламенту та Ради від 22 вересня 2010 року стосовно Європейської залізничної мережі для конкурентних вантажних перевезень, а також науково-дослідних робіт за темами: "Integrated rail freight optimization in Ukraine: Railwaysleepers, rolling stock and logistics" (ДР № 0123U102700), "Дослідження та розробка правил рівноправного доступу до інфраструктури залізничного транспорту загального користування" (ДР №0117U005413), у яких авторка брала участь у якості виконавця.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розвиток теоретичних положень, методологічних основ і практичних рішень щодо підвищення якості і надійності експлуатації залізничної транспортної системи в умовах впливу факторів невизначеності і ризику шляхом підвищення ефективності існуючих та впровадження нових управлінських технологій.

Для досягнення вказаної мети в роботі були поставлені такі основні завдання наукових досліджень:

- провести ідентифікацію факторів і джерел невизначеності в контексті управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту та аналіз існуючих підходів і методів оперування різними видами невизначеностей;
- провести аналіз поточного стану та можливості розвитку технологій оперування факторами невизначеності та ризик-менеджменту на основі огляду наукових джерел;
- провести аналіз техніко-експлуатаційних показників залізничних перевезень в Україні;
- провести ідентифікацію ознак невизначеності у зразках масивів даних, що використовуються для вироблення і прийняття рішень у сфері управління експлуатаційною роботою залізничної системи;
- розробити методи і технологію управління експлуатаційною роботою у галузі вантажних залізничних перевезень в умовах впливу факторів невизначеності та ризику;
- розробити методи і технологію управління експлуатаційною роботою у галузі пасажирських залізничних перевезень в умовах впливу факторів невизначеності та ризику;
- розробити методи і технології управління експлуатаційною роботою у сфері контейнерних перевезень як перспективної галузі транспортної системи України в умовах впливу факторів невизначеності та ризику;
- провести техніко-економічне обґрунтування запропонованих рішень на прикладі впровадження розробленої інтелектуальної транспортної технології.

*Об'єкт дослідження* – процес управління експлуатаційною роботою залізничної транспортної системи в умовах невизначеностей і ризиків.

*Предмет дослідження* – ризик-орієнтовані технології та технології управління експлуатаційною роботою залізничної транспортної системи, які реалізують підходи щодо оперування невизначеністю.

**Методи дослідження.** При виконанні дисертаційної роботи використовувались методи теорії управління експлуатаційною роботою на

залізничному транспорті, теорії систем та системного аналізу, теорії імовірностей, теорії Демпстера-Шафера, теорії випадкових процесів, теорії точкових процесів, математичної статистики, теорії ризиків, теорії надійності, теорії масового обслуговування, методи дослідження операцій, математичного моделювання, теорії прийняття рішень, математичного програмування, наукового прогнозування, теорії нейронних мереж, апарату теорії графів, класичні методи оптимізації, методи дискретної, комбінаторної, векторної та робастної оптимізації, методи теорії нечітких множин та нечіткої логіки, м'яких та еволюційних обчислень.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Розвинуто наукові основи управління експлуатаційною роботою залізничної транспортної системи, що забезпечують необхідний рівень надійності і ефективності її функціонування в умовах зростаючого рівня складності і чисельності викликів, пов'язаних з негативним впливом факторів невизначеності та ризику.

*Вперше:*

– розроблена технологія управління ризиками, яка спрямована на забезпечення дотримання термінів доставки вантажів в умовах невизначеностей та ризиків; запропонована технологія включає нові підходи до оптимізації роботи технічних станцій та впровадження сучасних методів управління, що дозволяють покращити ефективність технологічного процесу;

– з урахуванням технологічного фактору ризику (збільшення строків проведення сукупності транспортно-логістичних технологічних операцій) запропоновано і обґрунтовано метод управління процесом формування і просування контейнерних поїздів маршрутів в межах транспортно-логістичного ланцюга, у тому числі при кроскордонних перевезеннях, на основі оптимізаційної моделі стохастичного програмування, у якості критерія оптимізації якої виступає сума питомих експлуатаційних витрат по кожному елементу транспортно-логістичного ланцюга, а система обмежень враховує технічні і технологічні можливості залізничної інфраструктури і тягового рухомого складу;

– з урахуванням фактору невизначеності вихідної інформації (варіативність тривалості транспортних і вантажних операцій, "вікон" доступності вантажних фронтів) розроблено теоретичні основи технології швидкого залізничного сполучення між портами та підприємствами-вантажоотримувачами і вантажовідправниками в ході здійснення контейнерних перевезень на основі впровадження інноваційних технічних засобів, таких як модульні контейнерні поїзди типу CargoSprinter та автоматичні вантажні системи MetroCargo, а також розробленої робастної моделі оперативного планування роботи поїздів;

– в ході формування зазначеної вище технології був запропонований універсальний підхід для вирішення задач робастної оптимізації, на основі якого розроблений оригінальний метод оптимізації робастних моделей на базі використання сучасного математичного апарату генетичних алгоритмів (ГА). Даний метод на новому якісному рівні надає можливість постановки і вирішення широкого класу задач управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту завдяки наданню можливості оперувати даними, які характеризуються невизначеністю не лише стохастичного та статистичного, але й епістемічного типу.

*Дістали подальшого розвитку:*

– математичні моделі, які інтегрують сучасні методи обробки даних, такі як нечітка логіка, м'які обчислення та нейронні мережі, для покращення точності прогнозування та прийняття рішень в умовах невизначеності.

– комплексний підхід до управління залізничними системами, що дозволяє інтегрувати математичні моделі, оптимізаційні процедури та сучасні технології управління, забезпечуючи системний підхід до вирішення проблем невизначеності та ризиків в експлуатаційній діяльності;

– методи прогнозування часових рядів за рахунок запропонованого методу прогнозування пасажиропотоків із застосуванням нейронних мереж на основі архітектури генеративно-змагального типу.

*Удосконалено:*

– підходи до інтеграції сучасних технологій в управління залізничними перевезеннями, що дозволяють ефективно впроваджувати технології використання інноваційних технічних рішень, таких як CargoSprinter і MetroCargo, у традиційні системи управління залізничним транспортом.

**Практичне значення одержаних результатів.** Запропоновано практичні рішення, спрямовані на підвищення ефективності управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту в умовах дії факторів невизначеності та ризику, зокрема зменшення витрат на організацію перевезень та підвищення їх надійності. Розроблено підходи, математичні моделі та технології управління, які навіть в умовах неповних або суперечливих даних та можливості виникнення небажаних подій дозволяють, оптимізуючи використання ресурсів, забезпечити належний рівень ефективності перевізного процесу одночасно з високою якістю транспортних послуг. Отримані результати досліджень навіть за умов тривалого або постійного впливу негативних факторів невизначеності та ризику дозволяють комплексно підвищити ефективність функціонування залізничної системи: оптимізувати використання елементів інфраструктури та технічних засобів, зокрема технічних станцій, а також рухомого складу (локомотиви, вагони, контейнери) шляхом раціоналізації процесів накопичення контейнерних партій, формування та переформування поїздів, їх просування залізничною мережею, оптимізувати процеси місцевої роботи та процеси взаємодії залізничних підприємств з іншими видами транспорту, підвищити привабливість та конкурентоспроможність пасажирських перевезень.

Результати проведених досліджень рекомендовано застосовувати в оперативних та планових підрозділах залізниці у якості основи для побудови систем підтримки прийняття рішень (СППР) з подальшою їх інтеграцією до складу системи АСК УЗ Є у вигляді типових задач управління в умовах впливу факторів невизначеності і ризику, які є невід'ємними складовими перевізного процесу.

Деякі результати досліджень, такі як спосіб перевезення вантажів залізничним вагоном, а також система регулювання руху транспортних засобів, було оформлено у вигляді патентів (патенти України на корисну модель: 119656, 139834).

Практичне використання результатів роботи підтверджено відповідними актами впровадження на регіональній філії "Південна залізниця" у складі АТ "Українська залізниця" та у компанії-оператора ТОВ "Бруклін-Київ".

Отримані в дисертаційній роботі результати також використовуються в навчальному процесі кафедри управління експлуатаційною роботою УкрДУЗТ при підготовці здобувачів вищої освіти (бакалаврів і магістрів) за спеціальністю 275 – Транспортні технології (на залізничному транспорті).

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані особисто здобувачем або за його безпосередньої участі. У наукових працях, опублікованих зі співавторами, особистий внесок полягає у такому: у [1] проведено аналіз отриманих результатів розрахунків, пов'язаних з визначенням пропускнув спроможності залізничної дільниці, у [2] сформовано нечітку прогнозу моделі, у [3] здійснено моделювання та проведено аналіз отриманих результатів, у [4] здійснений аналіз динаміки пасажиропотоків у швидкісному залізничному сполученні, у [5] обґрунтовано створення відділу стратегічного планування з метою реалізації системи стратегічного управління пасажирськими перевезеннями, у [6] – збір та підготовка вихідних даних для проведення розрахунків, у [7] – розробка процедури для статистичного моделювання та частковий аналіз результатів моделювання, у [8] – обґрунтування використання математичного апарату теорії точкових процесів та корегування оптимізаційної математичної моделі, у [9] – ідентифікація факторів, що впливають на здійснення вибору пасажирями, розробка оптимізаційної математичної моделі планування роботи швидкісних пасажирських поїздів на напрямку, у [10] розроблено принцип кодування рішення з метою забезпечення можливості застосування математичного апарату ГА для вирішення задачі оптимізації маршрутів швидкісних пасажирських поїздів, у [11] запропоновано ідею поєднання технологій MetroCargo та CargoSprinter з метою посилення інтеграції морського і залізничного транспорту, розроблено оптимізаційну математичну модель оперативного планування контейнерних перевезень, розроблено спеціалізований генетичний алгоритм для оптимізації робастних моделей, у [12] розроблено оптимізаційну математичну модель управління станцією, у [13] розроблено математичну модель визначення маршруту пасажирських поїздів на засадах ризик-менеджменту, у [14] розроблено оптимізаційну математичну модель управління процесом формування контейнерних поїздів на основі використання ТІ та теорії часових точкових процесів, у [15] розроблено математичну модель управління прикордонною передавальною станцією на засадах ризик-менеджменту з метою здійснення своєчасного транскордонного трансферу вантажопотоків, у [16] розроблено нейромережеву модель визначення пріоритету обробки вагонів на технічних станціях з метою забезпечення своєчасної доставки вантажів, у [17] запропоновано підхід щодо забезпечення можливості агрегації інформації з різних джерел на основі положень теорії Демстера-Шафера, розроблено нелінійну модель обчислення ризику на основі використання функції щільності ризику, у [18] проведений статистичний аналіз даних, запропоноване удосконалення моделі розрахунку ПФП у вигляді функції залежності середньої тривалості переробки вагона від рівня завантаженості станції, проведений аналіз результатів розрахунків,

у [19] на основі реалізації підходів робастної оптимізації розроблено математичну модель управління роботою збірних поїздів на дільниці, здійснено аналіз результатів розрахунків, у [20] здійснено аналіз документів, регламентуючих взаємодію України і ЄС у сфері залізничного транспорту, у [21] визначення вимог до параметрів руху додаткових пасажирських поїздів, у [22] розроблено процедуру оптимізації цільової функції, у [23] здійснено історичний аналіз передумов виникнення поромних сполучень на Балтиці та Чорному морі, виконано аналіз факторів ефективної взаємодії залізничного і водного видів транспорту в контексті функціонування міжнародних логістичних систем, у [24] здійснено аналіз схем обслуговування залізничної клієнтури, у [25] – статистична обробка даних щодо залізничних перевезень небезпечних вантажів, у [26] – аналіз наслідків варіантів інтеграції систем управління залізничними підрозділами, у [27] запропоновано ідеї інтеграції морських портів та залізничних вузлів з метою опанування зростаючих міжнародних вантажопотоків, у [28] запропоновано і досліджено ідею розвитку мережі залізничних контейнерних перевезень на основі застосування технології MetroCargo, у [29] обґрунтовано ідею прокладення євроколії територією України з метою забезпечення функціонування балтійсько–чорноморського транспортного коридору, у [30] запропоновано та обґрунтовано ідею створення єдиного інформаційного простору для підвищення ефективності взаємодії залізничного і морського транспорту, у [31] – аналіз шляхів підвищення ефективності залізничного транспорту, у [32] – аналіз шляхів розвитку технологій обробки вагонів з небезпечними вантажами на сортувальних станціях, у [33] – обґрунтування впровадження терміналів MetroCargo в Україні, у [34] – аналіз джерел ризику при здійсненні управління роботою станції, у [35] – аналіз аспектів оптимізації роботи залізничного пасажирського транспорту, у [36] – аналіз аспектів функціонування логістичних ланцюгів із використанням залізничного і водного транспорту, у [37] – аналіз можливості застосування підходів теорії ігор для оптимізації технології перевезень зернових вантажів за допомогою залізничного транспорту, у [38] – ідентифікація факторів ризику при забезпеченні функціонування логістичного ланцюга, у [39] – аналіз можливості застосування математичного апарату нечіткої логіки другого типу для вирішення задач управління експлуатаційною роботою, у [40] – розробка елементів транспортної технології, у [41] – розробка елементів технології роботи системи регулювання руху транспортних засобів. Дослідження, що висвітлені в усіх наукових працях, проводилися в УкрДУЗТ.

**Апробація результатів дисертації.** Основні матеріали результатів дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали схвалення на таких наукових конференціях: Міжнародна науково-практична конференція "Інновації інфраструктури транспортно-логістичних систем. Проблеми, досвід, перспективи", 2016 р. (Україна, м. Трускавець); 31-а міжнародна науково-практична конференція "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті". 2018, (Україна, м. Харків); Міжнародна науково-практична Internet-конференція "Моделювання та інформаційні технології в науці, техніці та освіті", 2018, (Україна, м. Харків); International Conference "Transport Means", 2019, (Литва, м. Каунас); 1-а Міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні



транспортні технології», 2020, (Україна, м. Трускавець – м. Харків); The 4th International scientific and practical conference “Innovations and prospects of world science”, 2021, (Канада, м. Ванкувер); 2-а міжнародна науково-технічна конференція "Інтелектуальні транспортні технології" (ІТТ). 2021, (Україна, м. Харків); 3-я міжнародна науково-технічна конференція "Інтелектуальні транспортні технології" (ІТТ). 2022, (Україна, м. Харків); 4-а міжнародна науково-технічна конференція "Інтелектуальні транспортні технології" (ІТТ). 2023, (Україна, м. Харків); 20-а науково-практична міжнародна конференція "Міжнародна транспортна інфраструктура, індустриальні центри та корпоративна логістика" (NTI). 2024, (Україна, м. Харків); 37-а міжнародна науково-практична конференція "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті". 2024, (Україна, м. Харків). У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася на розширеному семінарі кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту.

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи і результати досліджень опубліковані в 41 науковій праці: 19 основних праць, з яких 19 статей у наукових фахових виданнях України; в тому числі 5 наукових статей у виданнях, що індексуються наукометричними базами даних SCOPUS та/або WoS (з них 5 – третього квартилю (Q3)), та 22 працях, які додатково відображають наукові результати досліджень в тому числі 4 – в закордонних наукових виданнях, індексованих наукометричними базами даних SCOPUS та/або WoS, 2 патенти України на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація має вступ, вісім розділів, висновки, список використаних джерел з 228 найменувань і сім додатків. Повний обсяг дисертації складає 423 сторінки, у тому числі 328 сторінок основного тексту, 24 таблиці, 79 рисунків, 24 сторінки додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, об’єкт, предмет і завдання дослідження, відображено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено інформацію про апробації роботи і публікації основних результатів.

У **першому розділі** проведено аналіз онтології понять невизначеності та ризику, їх класифікації та застосування в технічній сфері та сфері управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту. Досліджено підходи щодо кількісної оцінки ризиків, а також до агрегації суперечливої інформації з різних джерел. Особливу увагу приділено ідентифікації факторів невизначеності, що впливають на прийняття рішень у сфері управління експлуатаційною роботою (рисунок 1).

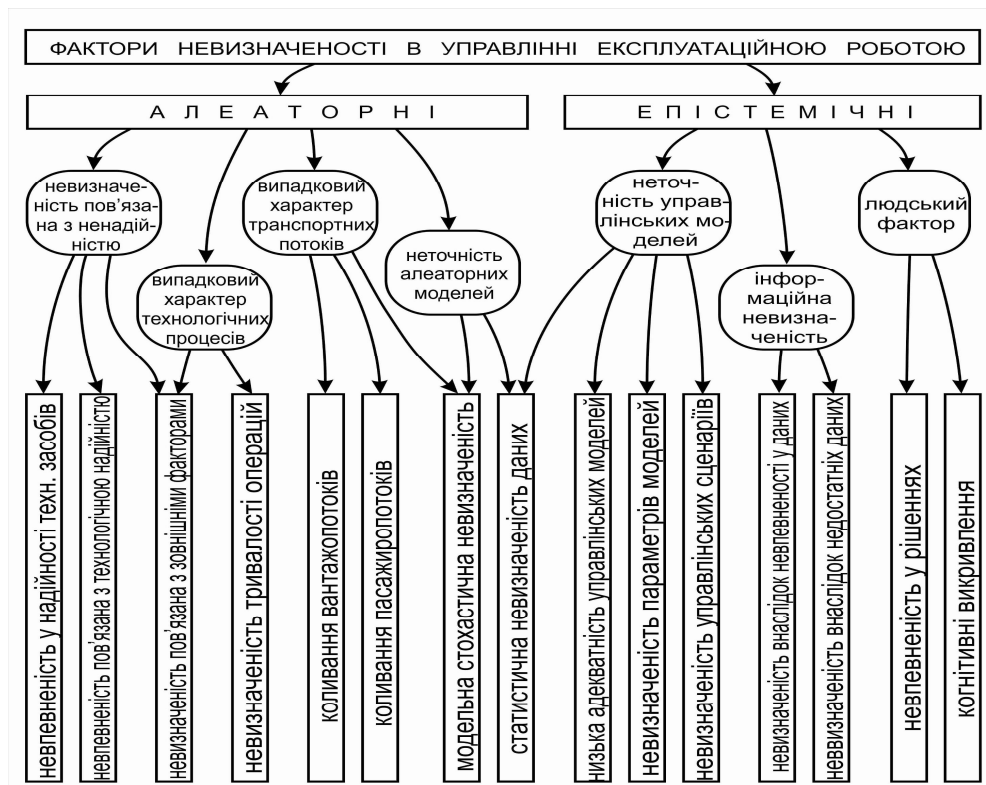


Рисунок 1 – Ідентифікація невизначеностей, що впливають на процеси управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту

Результати дослідження підкреслюють важливість застосування системного аналізу для розвитку як теоретичних, так і прикладних аспектів теорії управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту з метою інтегрування до її складу підходів та методів оперування невизначеністю та ризиками.

У другому розділі проаналізовано наукові статті, присвячені управлінню залізничними системами, з акцентом на вирішення проблем невизначеності та ризиків. Продемонстровано значущість цієї тематики для забезпечення ефективності, безпеки та надійності транспортних операцій. В результаті аналізу наукових публікацій було встановлено, що сфера управління експлуатаційною роботою в системах залізничних перевезень відзначається високим рівнем складності та взаємозалежності, що робить її вразливою до факторів невизначеності і ризику. У цьому контексті зробили значний внесок та отримали найбільш вагомні результати у сфері розробки методів та моделей, що оперують факторами невизначеності і ризику, наступні українські і зарубіжні вчені: Бутько Т. В., Жуковицький І. В., Кириченко Г. І., Колісник А. В., Коскіна Ю.О., Панченко С.В., Прохоров В.М., Прохорченко А.В., Чехунов Д.М., Altazin E., Bešinović N., Cacciabue P.C., Caprara A., Chen Chunyang, Dimitrov P., Ghofrani F., Govindan K., Guo C., Huang Y., Khalil A., McCartney S., Ren J., Shuib A., Zhang Q.

В контексті наукових публікацій розглянуто різноманітні підходи до моделювання та оптимізації залізничних систем, зокрема використання змішаного цілочислового програмування, імітаційного моделювання, метаевристичних алгоритмів і методів релаксації. Визначено ключові недоліки існуючих підходів, зокрема обмеженість моделей у врахуванні динамічних змін і випадкових факторів. Водночас акцентовано на необхідності застосування сучасних технологій, таких як

IoT та Big Data, для підвищення точності прогнозування та адаптації моделей до реальних умов.

У третьому розділі було проведено аналіз експлуатаційної діяльності залізничної системи України з метою оцінки її ефективності та виявлення ключових проблем. Залізничний транспорт, як стратегічно важливий елемент інфраструктури, забезпечує перевезення пасажирів і вантажів, сприяє економічному розвитку та соціальній стабільності. Однак, сучасний стан галузі демонструє негативні тенденції, такі як зменшення обсягів перевезень, що посилюються під впливом військових конфліктів. Основним джерелом прибутку залишаються вантажні перевезення, але скорочення їх обсягів призводить до зниження доходів і обмеження фінансування інфраструктури та рухомого складу.

Аналіз показників експлуатаційної роботи зокрема виявив стійке зменшення чисельності маневрових локомотивів, що погіршує якість управління технологічними процесами на сортувальних станціях. Нестача маневрових засобів викликає збої в місцевій роботі, що призводять до затримок прибирання вагонів і їх подачі на вантажні fronti, а також до порушення раніше побудованих планів. Це створює додаткові джерела невизначеності, зокрема збільшення простоїв вагонів, тривалості доставки вантажів і неоптимальний розподіл порожніх вагонів. Висока частка порожнього пробігу і зростання середньої тривалості обігу вантажного вагону підтверджують наявність системних проблем в управлінні. Також відзначено значне зростання вартості оренди вагонів через їх дефіцит, що свідчить про неефективність управлінських технологій у сучасних умовах.

Досліджено зразки інформаційних потоків, що використовуються ланкою управління, зокрема динаміку добового вантажного вагонопотоку певного напрямку на технічній станції, представленого у вигляді часового ряду (рисунок 2).

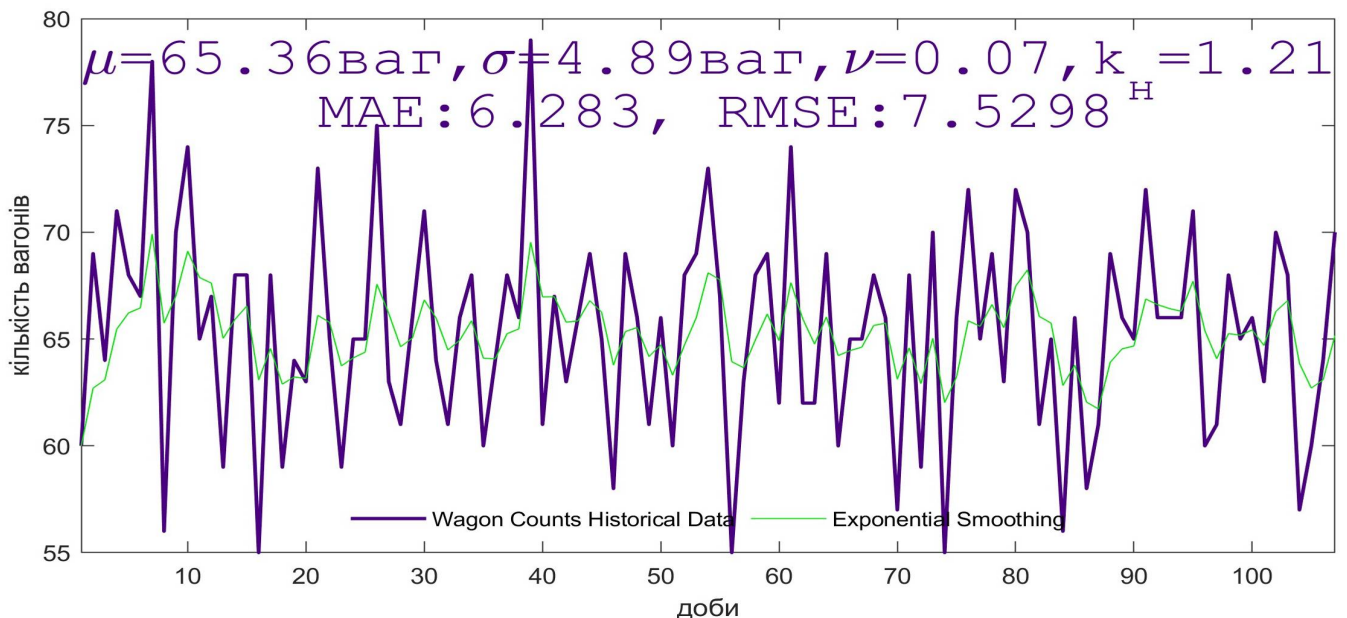


Рисунок 2 – Часовий ряд добового вагонопотоку та елементи його ідентифікації

Результати автокореляційного аналізу і вейвлет-аналізу (рисунок 3) показали слабку зв'язність між елементами ряду, складну часово-частотну структуру та

ознаки нестабільності. Метод R/S-аналізу (рисунок 4) виявив антиперсистентність, тобто тенденцію до раптових змін трендів та непередбачуваних коливань.

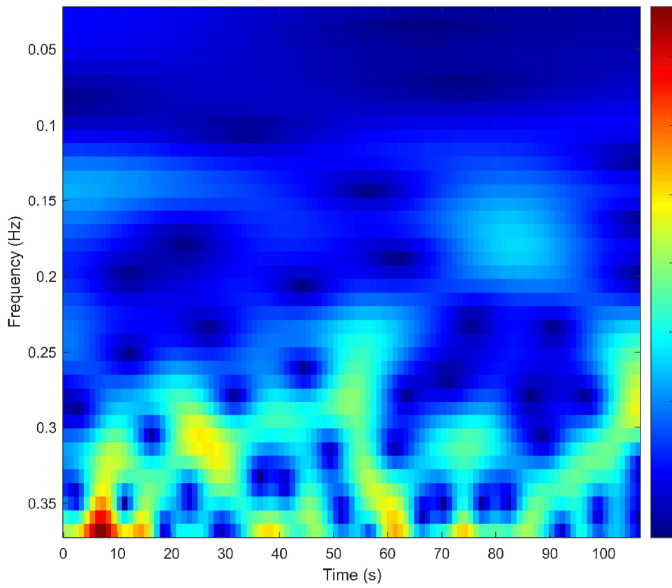


Рисунок 3 – Вейвлет-спектрограма часового ряду добового вагонопотоку

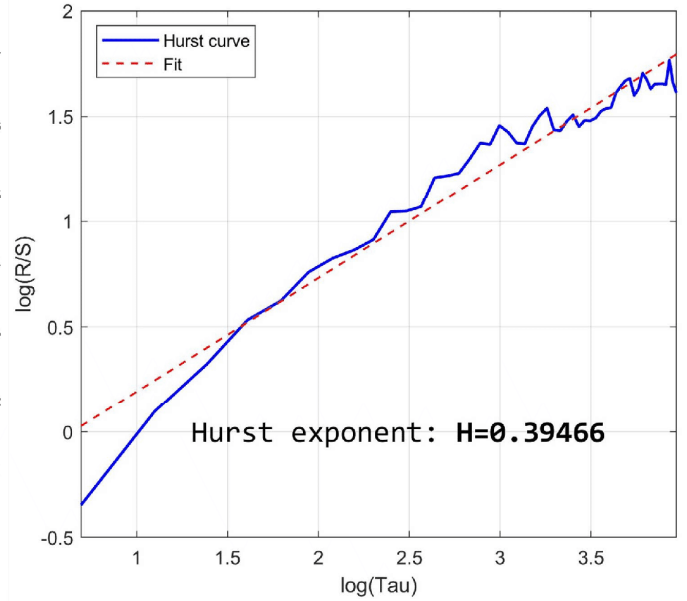


Рисунок 4 – R/S-діаграма часового ряду добового вагонопотоку

Процедура ідентифікації двозмінного часового ряду, що складається з пов'язаних змінних: інтервалу між надходженнями груп вагонів (рисунок 5а) та їх чисельності (рисунок 5б), який описує процеси надходження вагонів до сортувальної станції, виявила його високу варіативність.

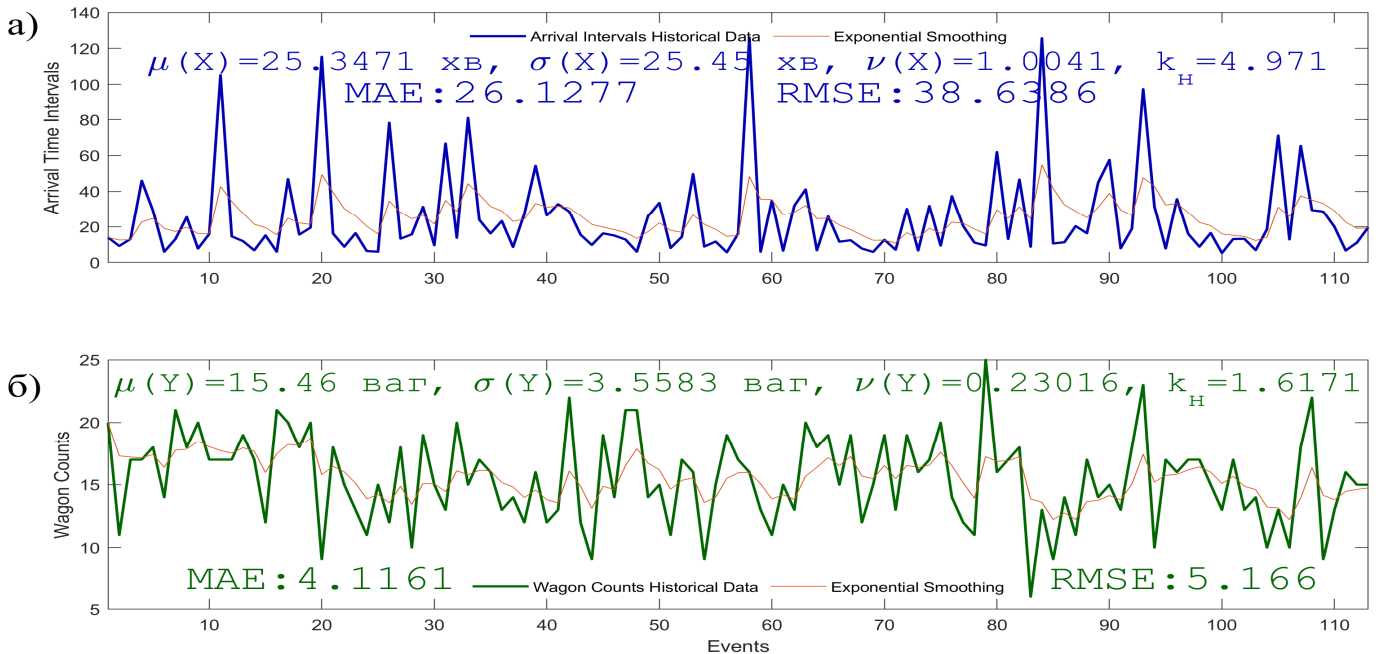


Рисунок 5 – Пов'язані часові ряди та елементи їх ідентифікації: а) інтервал між надходженням груп вагонів, б) чисельність груп вагонів

Подальший поглиблений аналіз із застосуванням таких тестів як тест причинності Грейнджера (таблиця 1), тест на гомоскедастичність Бройша-Пагана (рисунок 6), аналіз крос-кореляції виявили гетероскедастичність дисперсії похибок

(залишків) лінійних регресійних моделей та низький ступінь зв'язності між змінними, у той же час за допомогою крос-вейвлет аналізу (рисунок 7) була виявлена наявність складних нестабільних нелінійних зв'язків між змінними, що також свідчить про динамічну і високоволатильну структуру часових рядів. Крім того тест на чутливість (Ляпунова) підтвердив наявність елементів детермінованого хаосу в даних, що описують даний транспортний процес.

Таблиця 1 – Результати тестів причинності Грейнджера

№	Нульова гіпотеза (H0)	Відхиляється	Розподіл	$\chi^2$	p-значення	Критичне значення $\chi^2$
1	Виключити вплив змінної Y із затримкою у моделі X	ні	$\chi^2(12)$	10.1005	0.60714	21.0261
2		ні	$\chi^2(13)$	10.3070	0.66866	22.3620
3		ні	$\chi^2(1)$	0.1513	0.69734	3.8415
4		ні	$\chi^2(11)$	7.5667	0.75151	19.6751
5		ні	$\chi^2(10)$	6.4339	0.77759	18.3070
6	Виключити вплив змінної X із затримкою у моделі Y	ні	$\chi^2(20)$	28.5414	0.0972	31.4104
7		ні	$\chi^2(2)$	2.9467	0.2292	5.9915
8		ні	$\chi^2(1)$	1.2956	0.2550	3.8415
9		ні	$\chi^2(4)$	4.3122	0.3654	9.4877
10		ні	$\chi^2(3)$	2.9346	0.4018	7.8147

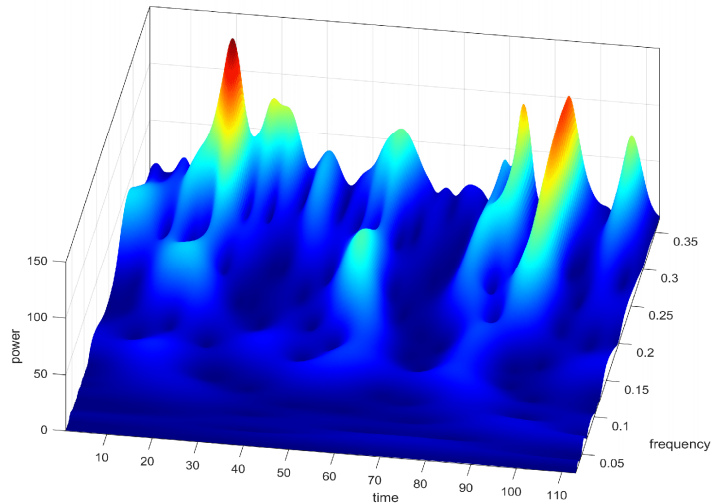
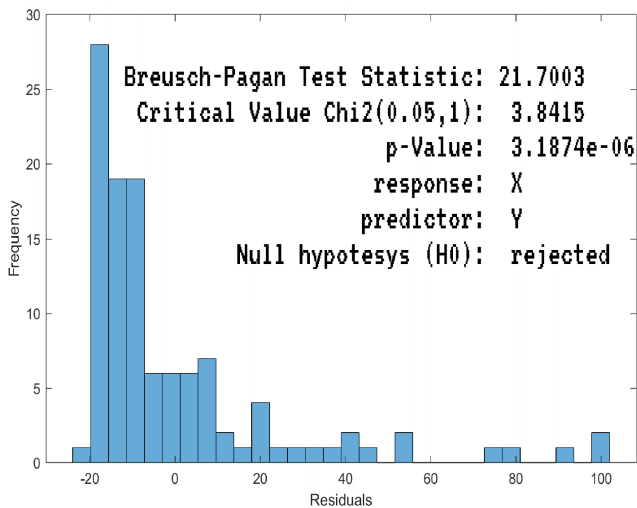


Рисунок 6 – Один з результатів тесту Бройша-Пагана (гістограма залишків свідчить про невідповідність до нормального закону)

Рисунок 7 – Спектрограма двозмінного часового ряду, отримана в ході крос-вейвлет аналізу

Таким чином, наявність складних комбінацій передбачуваних і хаотичних елементів, варіативності, стохастичності та нелінійності даних, що описують транспортний процес, вказують на високий ступінь невизначеності інформації, яка використовується при прийнятті управлінських рішень, а також на непридатність класичних лінійних моделей для її обробки в процесі управління експлуатаційною роботою. Отже, результати аналізу доводять необхідність розвитку нових підходів та технологій управління, здатних враховувати нелінійну динаміку і стохастичний характер транспортних процесів та бути ефективними в умовах дії гетерогенних факторів невизначеності і ризику.

У четвертому розділі було запропоновано нові підходи до вирішення класичних задач управління експлуатаційною роботою в умовах невизначеності, що сприяють підвищенню ефективності процесів управління залізничним транспортом. Розглянуто такий підхід до зменшення рівня невизначеності епістемічного типу, як уточнення математичних моделей. У рамках цього підходу запропоновано уточнення моделі розрахунку плану формування одногрупних вантажних поїздів (ПФП) за рахунок урахування впливу рівня завантаженості технічних станцій на витрати вагоно-годин в процесі обробки вагонопотоків. Запропоновано функціональна залежність, що враховує лінійне зростання часу обробки вагонів після досягнення певного порогового значення завантаженості, а також метод її побудови на основі апроксимації даних кусково-лінійною функцією із застосуванням методу найменших квадратів, (рисунок 8) легке застосування якого стає можливим завдяки представленню кусково-лінійної функції у синтезованій аналітичній формі.

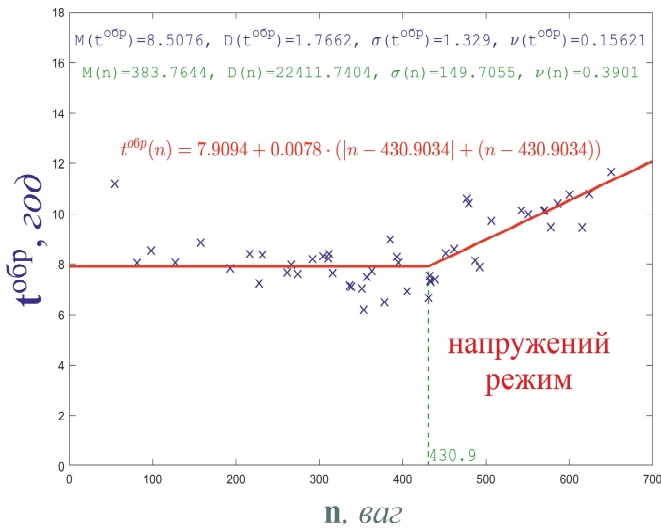


Рисунок 8 – Визначення залежності середньої тривалості переробки вагона на технічній станції від розміру добового вагонопотоку, що надходить у переробку

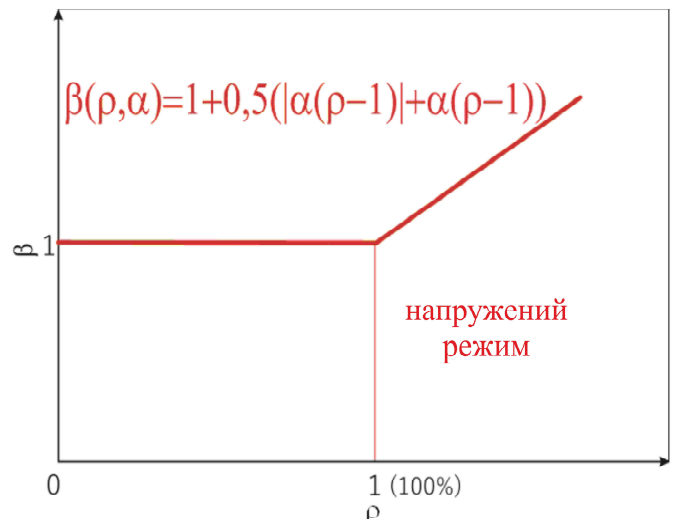


Рисунок 9 – Функції визначення коефіцієнту збільшення витрат вагоно-годин в залежності від рівня завантаженості станції

Запропонований підхід також дозволяє визначити це порогове навантаження на межі оптимального і напруженого режимів роботи. Згідно даного підходу його пропонується визначати як абсцису точки зламу кусково-лінійної функції, параметри якої розраховуються на основі статистичних даних. Зазначене уточнення запропоновано врахувати в моделі побудови ПФП у вигляді функції, яка обчислює коефіцієнт збільшення витрат в залежності від відносного рівня завантаженості станції (рисунок 9). Сформовано оптимізаційну математичну модель розрахунку ПФП, до складу якої було введено запропоновану функцію. Цільова функція моделі представлена критерієм сумарних витрат приведених вагоно-годин:

$$B(W) = \sum_{w \in W} c_w m_w^{norm} + \sum_{w \in W} \sum_{\substack{j \in J_w \\ s_j^{poc} \neq s_w^{poc}}} m_j t_w^{obr} \beta \left( \left( \frac{1}{m_w^{cp}} \left( \sum_{\substack{k \in W \\ s_k^{poc} = s_w^{poc}}} \sum_{q \in J_k} m_q + \sum_{\substack{y \in J \\ s_y^{kin} = s_w^{poc}}} m_y \right) \right), \alpha_w \right) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $W$  – змінна поточна множина виділених напрямів (поєднань або пучків струменів), де кожен елемент цієї множини, тобто кожен напрям, заданий як  $w = (s_w^{поч}, s_w^{кінц}, J_w, P_w)$ , де  $s_w^{поч}$  – початкова станція напрямку,  $s_w^{кін}$  – кінцева станція напрямку,  $P_w$  – впорядкована множина ділянок залізничної мережі, які відповідають маршруту даного напрямку,  $J_w$  – підмножина струменів вагонопотоку, що входять в цей напрям, кожен струмінь заданий як  $j = (s_j^{поч}, s_j^{кінц}, P_j, m_j)$ , де  $s_j^{поч}$  – початкова станція струменя,  $s_j^{кін}$  – кінцева станція струменя,  $P_j$  – впорядкована множина ділянок залізничної мережі, які відповідають маршруту даного струменя,  $m_j$  – потужність струменя вагонопотоку (середньодобова чисельність вагонів);  $J$  – множина всіх струменів вагонопотоку;  $P$  – множина всіх ділянок мережі;  $c_w$  – параметр накопичення на початковій станції напрямку  $w$ ;  $m_w^{норм}$  – норма кількості вагонів у складі поїзда на початковій станції напрямку  $w$ ;  $t_w^{обп}$  – витрати часу на переробку одного вагона (транзитного з переробкою) на початковій станції напрямку  $w$ ;  $\beta(\rho, \alpha)$  – функція, що повертає значення коефіцієнту збільшення витрат на переробку вагонів в залежності від ступеня завантаження станції  $\rho$  і коефіцієнту зростання витрат вагоно-годин при переробці вагонопотоків  $\alpha$  на даній станції;  $m_w^{сп}$  – гранична максимальна кількість вагонів, що може бути перероблена станцією, яка є початковою станцією напрямку  $w$ , в оптимальному режимі роботи.

Перший доданок цільової функції представляє витрати в процесі накопичення составів, другий доданок представляє витрати, пов'язані з переробкою транзитних вагонопотоків на технічних станціях. Модель також містить систему обмежень, що призначені для забезпечення коректності отриманих рішень. Результати розрахунків, які були здійснені за допомогою процедури оптимізації на основі генетичного алгоритму (ГА), наведені на рисунку 10 а також в таблиці 2. Розрахунки були здійснені також із використанням стандартної моделі і тих самих вихідних даних. З таблиці 2 видно, що врахування ефекту збільшення витрат вагоно-годин в напружених режимах роботи станцій дозволило не лише підвищити точність моделі і зменшити вплив факторів епістемічної невизначеності на стратегічному рівні управління перевізним процесом, але й, як наслідок, знизити реальні сукупні витрати на накопичення і переформування составів на технічних станціях на 3,5% у порівнянні з типовою моделлю, що підтвердило ефективність запропонованого підходу.

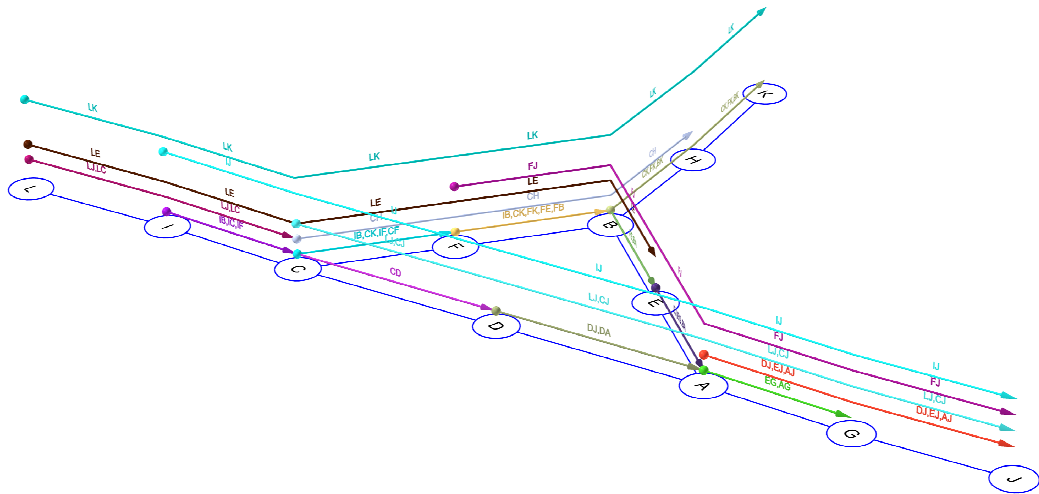


Рисунок 10 – Варіант ПФП, отриманий із використанням уточненої моделі

Таблиця 2 – Результати розрахунків ПФП

№	Струммені у складі напрямків	Початкова станція	Кінцева станція	маршрут	Потужність призначення	Кількість вагонів, для яких маршрут є кінцевим	Кількість вагонів, що переробляються на кінцевій станції	Параметр накопичення призначення	Витрати часу на переробку одного вагона на кінцевій станції маршруту	Витрати на переробкування	Витрати на накопичення	В тому числі додаткові витрати на переробкування внаслідок перевантаження станції
1	EG,AG	A	G	A,G	46	46	0	9.5	7.3	0	522.5	0
2	DJ,EJ,AJ	A	J	A,G,J	138	138	0	9.5	7.8	0	522.5	0
3	FE,BA	B	E	B,E	35	15	20	9.4	4.5	90	517	0
4	CK,FK,BK	B	K	B,H,K	115	115	0	9.4	7.1	0	517	0
5	CD	C	D	C,D	60	60	0	9.2	7.5	0	506	0
6	IB,CK,IF,CF	C	F	C,F	107	57	50	9.2	7.5	375	506	0
7	CH	C	H	C,F,B,H	35	35	0	9.2	7.2	0	506	0
8	LJ,CJ	C	J	C,D,A,G,J	63	63	0	9.2	7.8	0	506	0
9	DJ,DA	D	A	D,A	79	34	45	9.2	8.5	382.5	506	0
10	EJ,EG,BA	E	A	E,A	81	20	61	9	8.5	527.142	495	8.642
11	IB,CK,FK,FE,FB	F	B	F,B	153	78	75	9.4	7.5	703.125	517	140.625
12	FJ	F	J	F,B,E,A,G,J	46	46	0	9.4	7.8	0	517	0
13	IB,IC,IF	I	C	I,C	87	20	67	9.7	7.5	502.5	533.5	0
14	IJ	I	J	I,C,D,A,G,J	49	49	0	9.7	7.8	0	533.5	0
15	LJ,LC	L	C	L,I,C	42	22	20	9.6	7.5	150	528	0
16	LE	L	E	L,I,C,F,B,E	55	55	0	9.6	4.5	0	528	0
17	LK	L	K	L,I,C,F,B,H,K	85	85	0	9.6	7.1	0	528	0
	Всього									2730.267	8789	149.267
	Значення цільової функції										11519.27	
	Сумарні витрати вагоногодин згідно до варіанту ПФП, отриманого без урахування додаткових витрат, пов'язаних з перевантаженням станції, після їх урахування										11924.98	
	Економія вагоногодин										405.714	
	Економія %										3.522	

Інший підхід було спрямовано на подолання негативного впливу факторів невизначеності алеаторного типу. Він був застосований на прикладі задачі управління місцевою роботою на залізничній дільниці, яка вперше була формалізована як задача стохастичної робастної оптимізації. Невизначеність, в контексті даної задачі пов'язана з коливаннями обсягів місцевої роботи на станціях дільниці. Обсяги місцевої роботи моделюються за допомогою імовірнісних



інтервальних чисел а також дискретного статистичного, або, у разі його відсутності, біноміального розподілу імовірностей. Сформована цільова функція моделі з метою забезпечення робастного підходу реалізує принцип мінімаксу і представляє критерій сумарних витрат вагоно-годин при обслуговуванні дільниці місцевої роботи збірними поїздами. Стохастична компонента даної моделі виражена в тому, що змінні, які представляють обсяги місцевої роботи, було запропоновано представляти у вигляді імовірнісних інтервальних чисел. Крім того для представлення даних змінних було обґрунтовано використання біноміального виду розподілу, як такого, що найбільш адекватно моделює процеси, які одночасно пов'язані з дискретними змінними (кількість вагонів), а також бінарним вибором (вагон або буде завантажений або ні). Стохастична компонента моделі реалізована у вигляді обмеження і дозволяє підвищити якість отриманих рішень, відсікаючи варіанти, імовірність яких є нижчою певного заданого рівня, у той же час зберігаючи робастність отриманих рішень, що і було підтверджено за результатами моделювання.

**У п'ятому розділі** було розглянуто проблему недотримання строків доставки вантажів на залізничному транспорті, що є однією з ключових причин репутаційних та фінансових втрат Укрзалізниці. Зокрема, виявлено, що значна частина часу затримки припадає на перебування вагонів на сортувальних станціях, що робить їх основним джерелом резервів в контексті вирішення даної проблеми. Була розроблена нейромережева модель визначення пріоритетності обробки вагонів на основі таких параметрів вагона, як поточна затримка, залишковий час слідування та провізна плата (яка безпосередньо впливає на рівень фінансових наслідків у вигляді штрафів за несвоєчасну доставку вантажу). Таким чином була реалізована стохастична прогнозна модель з прихованими параметрами. Однак такі моделі, які фактично представляють чорні скрині, – не відповідають вимогам прозорості, які висуваються до систем підтримки прийняття рішень (СППР). Управлінське рішення, прийняте такою моделлю, важко пояснити і процес його прийняття неможливо відслідкувати. За таких умов раціональним підходом до ефективного вирішення даної проблеми було б явне використання поняття ризику і максимально точна формалізація факторів ризику, що безпосередньо впливають на своєчасність доставки вантажів. Однак підвищення рівня точності оцінки ризику можливе лише за рахунок зменшення рівня невизначеності, який лежить в його основі. Дана невизначеність має як алеаторну так і епістемічну складову. Алеаторна складова фактично є фундаментальною ознакою перевізного процесу, на неї майже неможливо вплинути в рамках управлінського процесу. І навіть для її точного оцінення необхідне максимально повне володіння інформацією, брак і неповнота якої і представляють іншу складову невизначеності – епістемічну. Раціональним шляхом зменшення рівня епістемічної невизначеності є максимальне використання всієї наявної інформації. Однак проблема полягає в тому, що цій наявній інформації зазвичай також притаманні ознаки епістемічної невизначеності: вона може представляти певні судження, інтервальні оцінки, мати інші ознаки нечіткості, інформація з різних джерел може бути суперечливою. З метою подолання цих проблем було запропоновано підхід на основі використання теорії Демпстера-Шафера (ТДШ), яка певною мірою є альтернативою теорії імовірностей.

На основі використання правила Демпстера, яке дозволяє оцінювати ступінь впевненості, одночасно враховуючи інформацію з різних джерел, була запропонована модель, яка розширює даний підхід і на випадок нечіткої інформації. Для випадку двох джерел даний підхід може бути реалізований у вигляді наступної моделі:

$$m_{\tilde{C}} = (\mu_{\tilde{A}} \oplus \mu_{\tilde{B}})_{\tilde{C}} = N[\mu_{\tilde{C}}(t_3)] = N \left[ \frac{\sum_{\tilde{A} \cap \tilde{B} = \tilde{C}} \mu_{\tilde{A}}(t_3) \cdot \mu_{\tilde{B}}(t_3)}{1 - \sum_{\tilde{A} \cap \tilde{B} = \tilde{\emptyset}} \mu_{\tilde{A}}(t_3) \cdot \mu_{\tilde{B}}(t_3)} \right], \quad (2)$$

де  $t_3$  – змінна тривалості затримки доставки вантажу;  $\mu_{\tilde{A}}(t_3), \mu_{\tilde{B}}(t_3)$  – функції приналежності нечітких чисел  $\tilde{A}$  (прогнозна інформація з АСК ВП УЗ Є) і  $\tilde{B}$ ;  $\tilde{C}$  – нечітке число, яке є результатом агрегації нечітких чисел  $\tilde{A}$  і  $\tilde{B}$  згідно до правила Демпстера, з відповідною функцією приналежності  $\mu_{\tilde{C}}(t_3)$ , яка відіграє роль мас-функції;  $N[\dots]$  – операція нормалізації функції приналежності;  $(\mu_{\tilde{A}} \oplus \mu_{\tilde{B}})_{\tilde{C}}$  – результат композиції у вигляді мас-функції, що представлена нормалізованою функцією приналежності нечіткого числа  $\tilde{C}$ ;  $\tilde{\emptyset}$  – порожня нечітка множина. Нормалізація полягає у множенні функції приналежності отриманого нечіткого числа на нормалізуючий коефіцієнт, який обчислюється за формулою:

$$k = \frac{1}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_{\tilde{C}}(t_3)}. \quad (3)$$

На рисунку 11 наведений результат використання даної моделі на прикладі двох нечітких трикутних чисел:

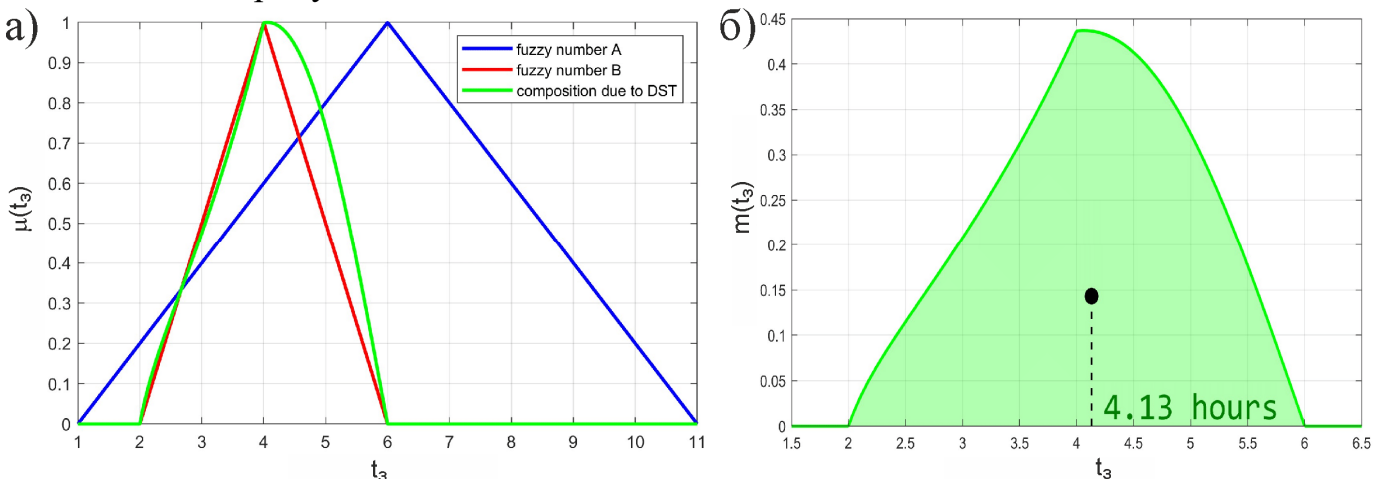


Рисунок 11 – Агрегація нечіткої інформації з двох альтернативних джерел: а) трикутні числа, що представляють нечіткі оцінки величини запізнення прибуття вагона та результат їх агрегації у вигляді нечіткого числа згідно до підходів ТДШ б) кінцевий результат після застосування операції нормалізації, який представляє мас-функцію впевненості

Для чисельного оцінювання ступеня ризику необхідно також мати оцінку наслідків негативної події. Однак несвоєчасне доставлення вантажу не є строго бінарною або навіть дискретною подією, а характеризується також ступенем запізнення, який виражається у термінах часу, який до того ж є безперервною величиною. І наслідки події зазвичай знаходяться в безпосередній залежності не лише від величини провізної плати але й від ступеня цього запізнення. Таким чином наслідки можуть бути представлені у вигляді штрафної функції, яка в загальному вигляді може бути нелінійною та якою завгодно складною. Тоді, враховуючи той факт, що на мас-функції в ТДШ накладаються фактично такі ж обмеження як і на функції щільності в теорії імовірностей, добуток мас-функції впевненості і штрафної функції можна назвати функцією щільності ризику, яку можна обчислити наступним чином:

$$\rho(t_3) = m_{\tilde{c}}(t_3) \Upsilon(t_3, E). \quad (4)$$

Тоді функцію ризику (залежність чисельної оцінки величини ризику від нечіткої оцінки ступеня затримки) можна визначити наступним чином:

$$R(t_3) = \int_0^{+\infty} m_{\tilde{c}}(t_3) \Upsilon(t_3, E) dt_3, \quad (5)$$

де  $m_{\tilde{c}}(t_3)$  – мас-функція впевненості у затримці вагона;  $\Upsilon(t_3, E)$  – функція штрафу за недотримання строку доставки вантажу;  $E$  – провізна плата.

Таким чином, запропонований підхід дозволяє здійснювати чисельні оцінки величини ризику не точково або на основі принципу бінарних подій, а максимально комплексно, оцінюючи весь часовий інтервал можливого запізнення, враховуючи несталу, нелінійну і безперервну природу як мас-функції впевненості так і штрафної функції.

З метою реалізації запропонованого підходу була розроблена оптимізаційна модель оперативного управління сортувальними станціями, яка базується на принципах векторної оптимізації та включає дві цільові функції, які реалізують наступні цільові критерії: експлуатаційних витрат і ризику, пов'язаного з можливістю недотримання строків доставки вантажів:

$$\begin{cases} f_1(X) = E_1(X) + E_2(X) + E_3(X) + E_4(X) + E_5(X) \rightarrow \min \\ f_2(X) = \sum_{j=1}^{\#W} R_j(X_j) \rightarrow \min \end{cases}, \quad (6)$$

де  $E_1(X)$  – частка експлуатаційних витрат, пов'язана із витратами вагоно-годин в підсистемі розформування/формування;  $E_2(X)$  – витрати, пов'язані із витратами вагоно-годин в наслідок перебування вагонів в підсистемі приймання поїздів;  $E_3(X)$  – експлуатаційні витрати, пов'язані із витратами вагоно-годин в наслідок перебування вагонів в підсистемі відправлення поїздів;  $E_4(X)$  – частка експлуатаційних витрат, пов'язана із маневровою роботою;  $E_5(X)$  – частка експлуатаційних витрат, пов'язана із підсистемою місцевої роботи;  $X$  – вектор

кортежів,  $X = \left\{ \left( d_j, \tau_j^n, o_j^p, \tau_j^p, q_j, \tau_j^{ng}, e_j^m, \tau_j^e \right) \right\}$ , де  $d_j$  – напрям прямування  $j$ -го вагона, тобто номер напрямку згідно до ПФП на які формує поїзди дана станція,  $\tau_j^n$  – момент часу прибуття поїзда з  $j$ -им вагоном на станцію,  $o_j^p$  – порядок (черговість) розформування поїзда з  $j$ -им вагоном на сортувальній гірці або іншим методом,  $\tau_j^p$  – момент часу закінчення розформування поїзда, з яким прибув до станції  $j$ -ий вагон,  $q_j$  – колія накопичення у СП, на якому накопичується состав, до складу якого потрапив  $j$ -ий вагон,  $\tau_j^{ng}$  – момент часу завершення перестановки сформованого составу, що містить  $j$ -ий вагон, до парку відправлення,  $e_j^m$  – виконавець (маневровий локомотив), що здійснював маневрові операції з  $j$ -им вагоном,  $\tau_j^e$  – момент часу відправлення поїзда у складі з  $j$ -им вагоном зі станції;  $W$  – множина вагонів, яка представляє вагонообіг станції, що відповідає обраному горизонту планування, а  $\#W$  – це потужність цієї множини;  $R_j(X_j)$  – величина ризику, що пов'язаний з можливістю недотримання строку доставки вантажу  $j$ -им вагоном.

Модель також містить систему обмежень, яка забезпечує відповідність отриманих рішень до вимог технологічного процесу станції.

Моделі векторної оптимізації, і особливо складні, які призначені для моделювання роботи цілих систем, таких як, наприклад, сортувальна станція, потребують особливого підходу до процесу оптимізації.

Для вирішення задач векторної оптимізації, які не тільки є багатокритеріальними, але й мають комбінаторний характер, стандартні методи оптимізації виявляються недостатньо ефективними через складність пошуку рішень у величезному просторі можливих комбінацій. У таких випадках потрібен підхід, здатний одночасно враховувати специфіку комбінаторних задач і досягати високої точності при пошуку компромісних рішень. Процедура оптимізації розробленої моделі була сформована на основі застосування алгоритму SPEA-2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2). Ексклюзивність алгоритму SPEA-2 полягає в його здатності ефективно працювати саме із задачами такого типу завдяки поєднанню таких ключових особливостей як поєднання еволюційного підходу з аналізом Парето-фронт, оптимізація в умовах комбінаторної складності та великої розмірності, унікальний механізм архівування рішень, гнучка адаптація під специфіку задачі. Однак задача будь якого алгоритму багатокритеріальної оптимізації закінчується на етапі формування якісного Парето-фронт рішення-кандидатів. Для багатокритеріальних задач, навіть після формування якісного Парето-фронт за допомогою алгоритму SPEA-2, залишається невирішеним питання вибору єдиного оптимального рішення. Цей етап є ключовим у практичному застосуванні результатів, оскільки реальна система зазвичай вимагає

конкретного варіанту, який найкраще відповідає поточним умовам або пріоритетам.

$$U(f_1, f_2) = \alpha + \beta \left(1 - \sqrt{f_1^2 + f_2^2}\right) + w_1 \lambda \tanh(-\gamma f_1) + w_2 \mu \ln\left(\frac{1}{1 + \delta f_2}\right), \quad (7)$$

де  $f_1, f_2$  – значення цільових функцій;  $w_1, w_2$  – вагові коефіцієнти, що відповідають цільовим критеріям;  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \lambda, \mu$  – технічні коефіцієнти.

Дана функція корисності виступає як інструмент для побудови компромісів між двома основними критеріями: сумарними експлуатаційними витратами та сумарним ризиком. Вона поєднує нелінійні механізми для моделювання складних взаємозв'язків та механізми уступок, що дозволяє балансувати економічні та ризик-орієнтовані фактори й адаптивно приймати рішення в умовах конкуруючих критеріїв. Результати розрахунків щодо виділення єдиного компромісного рішення з множини Парето за методом функції корисності наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Виділення компромісного рішення з множини Парето

елемент	$f_1$	$f_2$	$U(f_1, f_2)$
1	179557.5	4021.2	0.7238
2	178995.9	4521.5	0.7790
3	178615.4	5918.3	0.7847
4	178527.1	6196.2	0.7841
<b>5</b>	<b>177377.0</b>	<b>8117.5</b>	<b>0.8040</b>
6	176909.8	9164.4	0.7738
7	176720.0	9782.7	0.7413
8	176180.5	11105.2	0.6683
9	176173.0	11327.8	0.6482
10	175741.4	11460.6	0.6662
11	174663.3	11479.8	0.7352
12	174065.7	12658.6	0.6447
13	170133.4	13637.4	0.7307

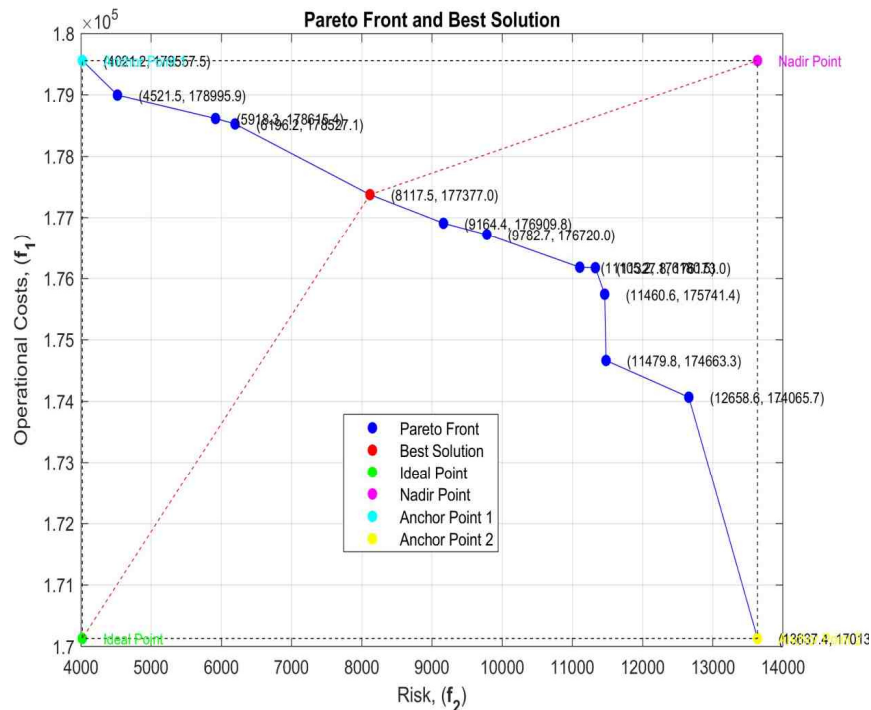


Рисунок 12 – Парето-фронт векторів рішень, отриманий в результаті оптимізації, та референсні точки та компромісне рішення

Розроблено програмний модуль, до складу якого було включено не лише модель, процедуру її оптимізації та операцію компромісного вибору, але й процедуру аналізу параметрів та графічної інтерпретації отриманого рішення у вигляді плану-графіку роботи станції. За допомогою даного модуля було проведено моделювання на основі використання розробленої моделі та на основі традиційної технології оперативного планування роботи сортувальної станції. Значення цільових критеріїв, отриманих в результаті моделювання, наведені в таблиці 3.

Графічна інтерпретація отриманого оптимального рішення у вигляді плану-графіку роботи станції наведено на рисунку 13.

Таблиця 3– Значення цільових функцій отриманих в результаті моделювання

цільовий критерій	технологія			
	традиційна	на основі моделі	різниця	%
Експлуатаційні витрати, $f_1$ , грн	192785,4	177377,0	-15408,4	-7,99
Величина ризику, $f_2$ , грн	21588,9	8117,5	-13471,4	-62,4

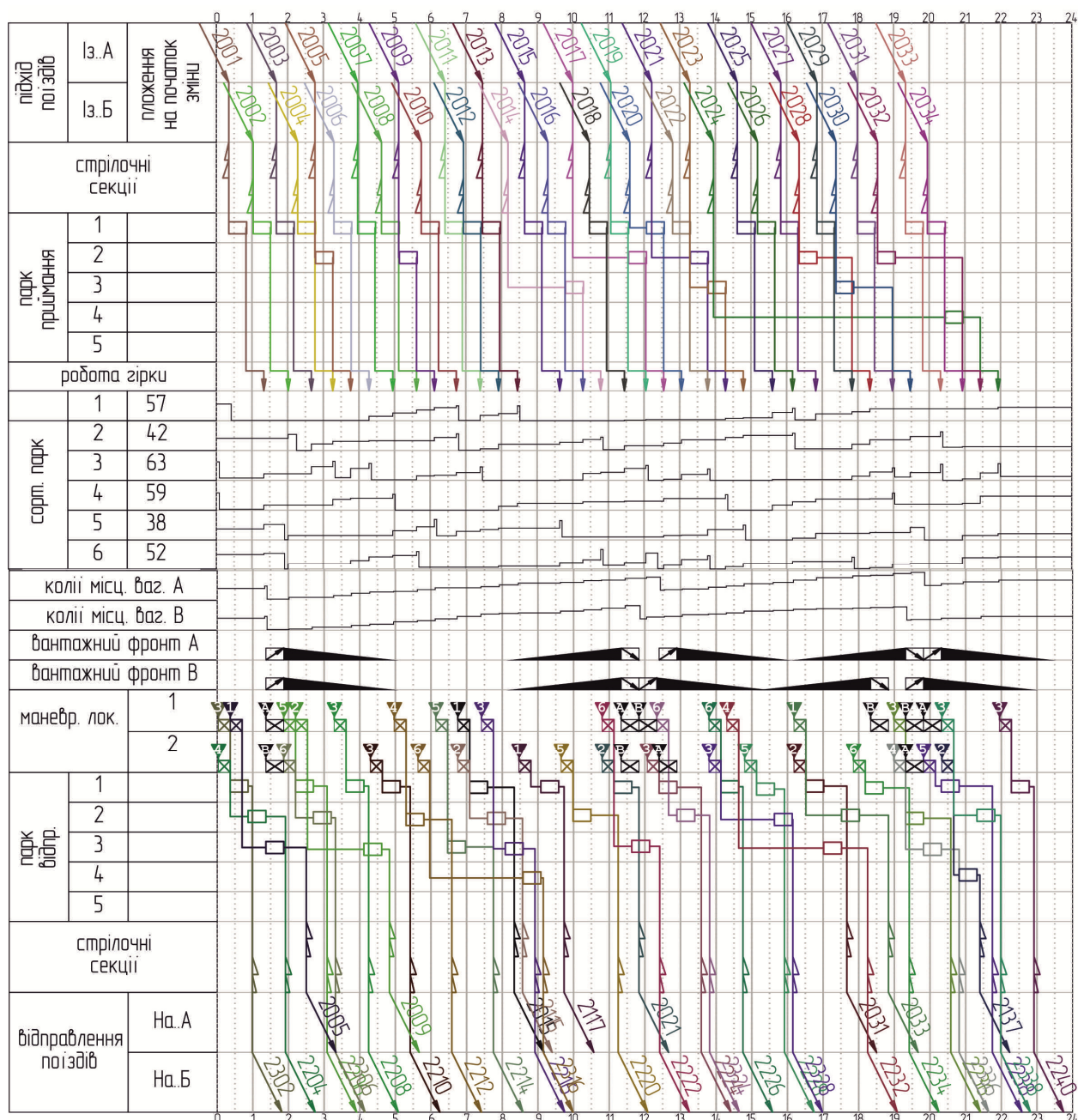


Рисунок 13 – Добовий план-графік роботи станції, отриманий в результаті оптимізації на основі розробленої моделі

Таким чином, ефективність запропонованих підходів підтверджено розрахунками, які показали не лише зменшення ризику затримок на 62,4% алей й зниження експлуатаційних витрат на 7,99% і. Отримані результати свідчать про

значний потенціал інтеграції сучасних методів ризик-менеджменту та технологій цифровізації в процес управління залізничними перевезеннями.

У шостому розділі було вирішено задачу організації швидкісного сполучення на напрямку, виконано комплексний аналіз можливостей використання високошвидкісних поїздів як допоміжного транспорту для інтермодального пасажирського перевезення, зокрема в умовах організації туристичних подорожей у вигляді морських круїзів. Було з'ясовано, що ефективність такого транспорту значною мірою залежить від точності оцінки пасажиропотоків і врахування факторів невизначеності, зокрема об'єктивних та суб'єктивних факторів вибору пасажирів при прийнятті рішень про здійснення подорожі. У разі якщо залізничний транспорт використовується у якості допоміжного виду транспорту, то одним з ключових факторів є тривалість поїздки, яку більшість пасажирів з об'єктивних причин хотіли б скоротити. Для вирішення задачі моделювання вибору, який здійснюють пасажирів, було розроблено нечітку модель оцінки корисності поїздки. Розроблена модель нечіткого виведення (англ. Fuzzy Inference System, FIS), яка у вигляді вхідних змінних враховує ключові фактори, що безпосередньо впливають на тривалість використання поїзда: швидкість руху та дальність подорожі. Для забезпечення можливості підвищення маршрутної швидкості швидкісних поїздів було запропоноване впровадження технології пропуску зупинок (англ. Skip-Stop). Однак у той же час виявилось що зменшення кількості зупинок з метою збільшення швидкості поїздів певною мірою негативно впливає на інший фактор привабливості швидкісного залізничного транспорту – його територіальної доступності. Тому в розроблена модель неявно у складі бази правил також враховує такі параметри як територіальна доступність швидкісного транспорту та вартість квитка, які фактично є частково конкуруючими з фактором швидкості. На основі поверхні відгуку розробленої нечіткої моделі, яка інтерпретувалася як функція корисності при прийнятті рішення пасажиром про здійсненні подорожі, за допомогою використання логіт-моделі було сформовано функцію впевненості в прийнятті рішення, зображення якої представлено на рисунку 14.

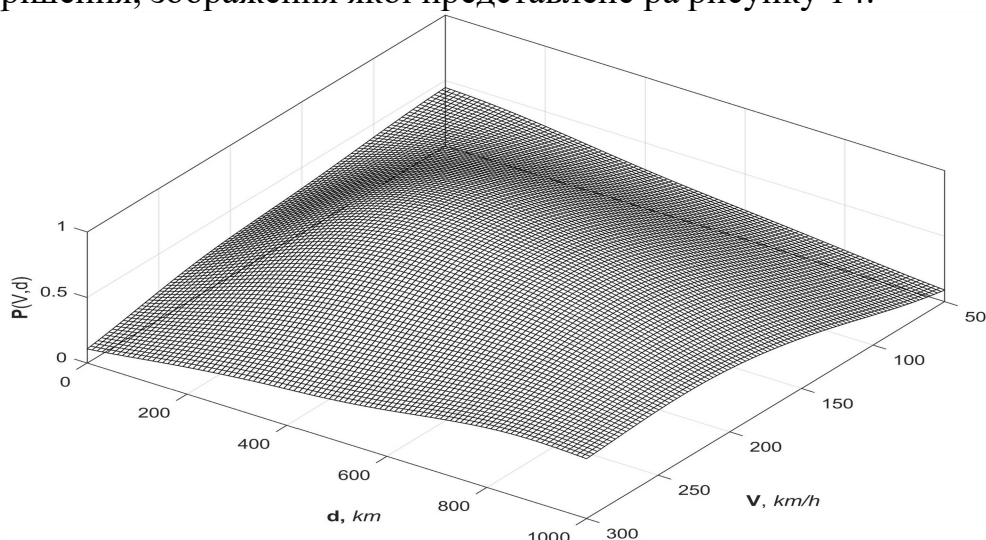


Рисунок 14 – Функція впевненості у тому, що потенційний пасажир вибере поїздку

Такий підхід надає можливість використання даної функції для коректного здійснення на її основі кількісних оцінок щодо групового вибору пасажирів та

обсягів пасажиропотоків, оскільки вона задовольняє нормувальним умовам, що забезпечують її відповідність вимогам теоретико-імовірнісної консистентності. Водночас для побудови ефективної системи організації швидкісних пасажирських перевезень необхідно також мати можливість точно оцінити масштаби потенційних пасажиропотоків з урахуванням кореспонденції між пунктами зупинок та взаємозалежностей між ними. З цією метою була розроблена прогнозна модель на основі використання нейронної мережі генеративно змагального типу GAN (англ. Generative Adversarial Network), що відноситься до класу інфраструктур машинного навчання генеративного штучного інтелекту. Архітектура розробленої моделі наведена на рисунку 15. Висока точність моделі забезпечується наявністю у її складі двох конкуруючих нейронних мереж: генератора і дискримінатора, які тренують одна одну в процесі навчання, який зображено на рисунку 16.

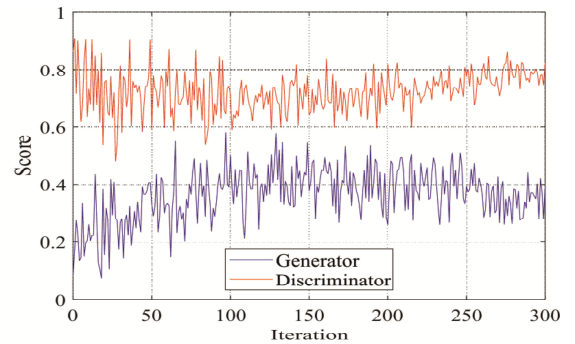
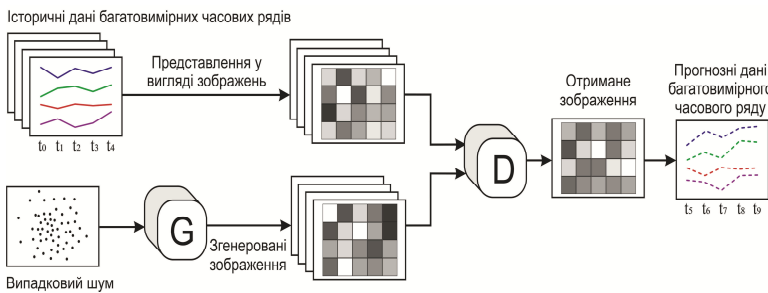


Рисунок 15 – Архітектура нейромережевої моделі для прогнозування обсягів кореспонденції потенційних пасажиропотоків, які представлені у вигляді багатовимірних часових рядів

Рисунок 16 – Динаміка оцінок якості роботи генераторної та дискримінаторної мереж в процесі навчання прогновної моделі

За результатами моделювання було встановлено, що величина середньої абсолютної відсоткової похибки прогнозу становила  $MAPE = 5,96\%$ . Висока точність прогнозу забезпечується тим, що навчальні історичні дані представлені у вигляді багатозмінних часових рядів, які до того ж в процесі навчання моделі перетворюються у формат зображень. Такий підхід запобігає втраті інформації про взаємозв'язки кореспонденцій пасажиропотоків.

З метою формування ефективної технології управління роботою системи швидкісних поїздів розроблено оптимізаційну математичну модель змішаного програмування, цільова функція якої реалізує критерій дохідності та спрямована на максимальне охоплення як туристичних так і інтерстанційних пасажиропотоків на напрямку:

$$C(X, \gamma) = \sum_{i=1}^k \sum_{a=1}^{\#S} \sum_{b=a+1}^{\#S} P(V(X_{i,:}, a, b), d(a, b)) \times c(X, a, b) \gamma_{i,a,b} q_{a,b} \left( I_{\{s_m | X_{i,m}=1\}}(s_a) \cdot I_{\{s_m | X_{i,m}=1\}}(s_b) \right) \rightarrow \max, \quad (8)$$

де  $X$  – змінна матриця, що містить булеві значення, що відповідають включенню зупинок на станціях маршруту всіх поїздів на лінії, кількість рядків  $k$  даної матриці дорівнює кількості швидкісних поїздів які доповнюють один одного по системі skip-stop і також може змінюватись, кількість стовпців даної матриці не змінюється і дорівнює потужності множини всіх станцій  $S$  на напрямку, на яких



можливі зупинки пасажирських поїздів, що записується як  $\#S$ ;  $I_{\{s_m | X_{i,m}=1\}}(s_a)$  – індикаторна функція, яка повертає значення 1 у разі приналежності елемента  $s_a$  до підмножини  $\{s_m | X_{i,m}=1\}$ , сформованої з впорядкованої множини  $S$  елементів станцій на напрямку, номери яких співпадають з номерами елементів  $i$ -го рядка матриці  $X$ , значення яких дорівнюють 1;  $d(a,b)$  – функція, що повертає відстань між станціями з порядковими номерами  $a$  і  $b$ ;  $V(X_{i,:}, a, b)$  – функція, що повертає значення величини середньої швидкості  $i$ -го поїзда між станціями з порядковими номерами  $a$  і  $b$ , в залежності від поточного стану елементів  $i$ -го рядка  $X_{i,:}$ , тобто в залежності від того, які зупинки  $i$ -го поїзда пропущені в поточній версії плану;  $c(X, a, b)$  – функція, що повертає вартість проїзду між станціями з порядковими номерами  $a$  і  $b$ , в залежності від поточного стану елементів матриці  $X$ , тобто в залежності від кількості поїздів а також максимальній теоретичній величині охопленого пасажиропотоку, що відповідає поточному стану елементів матриці, тобто схемі зупинок за технологією пропуску зупинок (англ. skip-stop), так як вартість квитка залежить від собівартості перевезень а також величини очікуваного прибутку;  $\gamma_{i,a,b}$  – елемент змінного тензору (тривимірної матриці)  $\gamma$ , що містить значення частки пасажиропотоку між станціями з порядковими номерами  $a$  і  $b$ , які перевозяться  $i$ -им поїздом;  $q_{a,b}$  – розрахунковий або прогнозний пасажиропотік між станціями з порядковими номерами  $a$  і  $b$ ;  $P(V(X_{i,:}, a, b), d(a, b))$  – функція, що повертає кількісну оцінку впевненості у тому, що потенційний пасажир вибере поїзду між станціями з порядковими номерами  $a$  і  $b$  на  $i$ -му швидкісному поїзді.

Проведене моделювання підтвердило, що розроблена модель дозволяє зберегти до 90% потенційного туристичного пасажиропотоку та обробити близько 50% трафіку між проміжними станціями. На рисунку 18 наведена отримана в результаті оптимізації розробленої моделі схема обслуговування напрямку двома швидкісними поїздами, яка реалізує технологію пропуску зупинок (англ. Skip Stop).

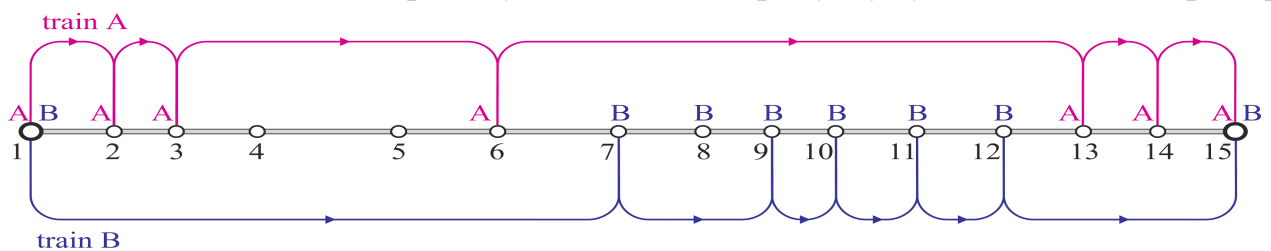


Рисунок 18 – Схема обслуговування напрямку двома швидкісними поїздами

Отримані результати свідчать про ефективність запропонованих підходів та розробленої моделі у сфері управління експлуатаційною роботою швидкісного пасажирського залізничного транспорту в умовах невизначеності.

У цьому розділі було проаналізовано вклад інтермодальних контейнерних перевезень у розвиток сфери міжнародної логістики. В результаті аналізу також було визначено ключову роль використання залізничного транспорту не лише у

якості основного засобу подолання "сухопутних мостів", але й як транспорту, що сполучає віддалені промислові райони з морськими портами в рамках систем інтермодальних контейнерних перевезень. Однак у той же час галузі залізничних контейнерних перевезень притаманний значний рівень невизначеності, що зумовлено низкою факторів: нестабільність обсягів вантажопотоків, яка залежить від змін у глобальній економіці, сезонних коливань попиту та непередбачуваних зовнішніх обставин, таких як геополітичні конфлікти чи природні катаклізми; інфраструктурні обмеження, зокрема недостатня пропускна здатність окремих залізничних напрямів, яка створює вузькі місця в системі перевезень; синхронізація між різними видами транспорту також пов'язана з невизначеністю та ризиками, яка певною мірою обумовлена конкуруючими інтересами задіяних транспортних підприємств. Однак найбільші проблеми, які пов'язані з невизначеністю та ризиками, відчуються на рівні оперативного і тактичного плануванні. В першу чергу вони пов'язані з внутрішньодобовою нерегулярністю термінальних контейнеропотоків. До того ж час просування сформованих поїздів до портів також є важкопрогнозованим внаслідок варіативності тривалості технічних операції з поїздом на попутних технічних станціях, в тому числі і припортових, перевантаженість яких є постійною проблемою. До того, важливим фактором є висока ціна помилок у плануванні, пов'язана в першу чергу з невизначеністю і ризиками у сфері взаємодії між залізничним і морським транспортом у контексті інтермодальних перевезень, ставить проблеми розробки сучасних технологій управління такими перевезеннями у розряд першочергових.

Було проведено дослідження термінальних контейнеропотоків (рисунок 19а) в ході якого за допомогою методу ядерної оцінки щільності (англ. Kernel Density Estimation, KDE) було доведено, що дані потоки є нестационарними (рисунок 19б), тобто їх основний параметр – інтенсивність – змінюється з часом. Нестационарність процесів надходження контейнерів також була додатково підтверджена в ході їх подальшого поглибленого аналізу із використанням спеціалізованих тестів, таких як: розширений тест Дікі-Фуллера на наявність одиничного коріння (ADF) та тест Квятковського-Філіпса-Шмідта-Шина (KPSS). Результати тестів наведено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Результати ADF та KPSS тестів

Статистика	Нульова гіпотеза (H0)	Відхиляється	Значення	Допоміжні параметри	
				p-значення	критичне значення
ADF	Ряд має одиничний корінь (є нестационарним)	Ні	-9.87888	0.081642	-1.94194
KPSS	Ряд є стационарним	Так	0.21089	0.011917	0.14600

Однак у той же час було доведено, що даним потокам, незважаючи на їх нестационарність, притаманні властивості потоків Пуассона, а саме: величина інтервалу часу між надходженням контейнерів підпорядковується експоненційному закону розподілу (рисунок 19в–г). За таких умов якісне прогнозування моментів надходження контейнерів, звісно, є практично неможливим, однак цілком можливим є прогнозування інтенсивності надходження контейнерів, як функції від

часу з точністю, достатньою для використання при управлінні процесом формування контейнерних поїздів.

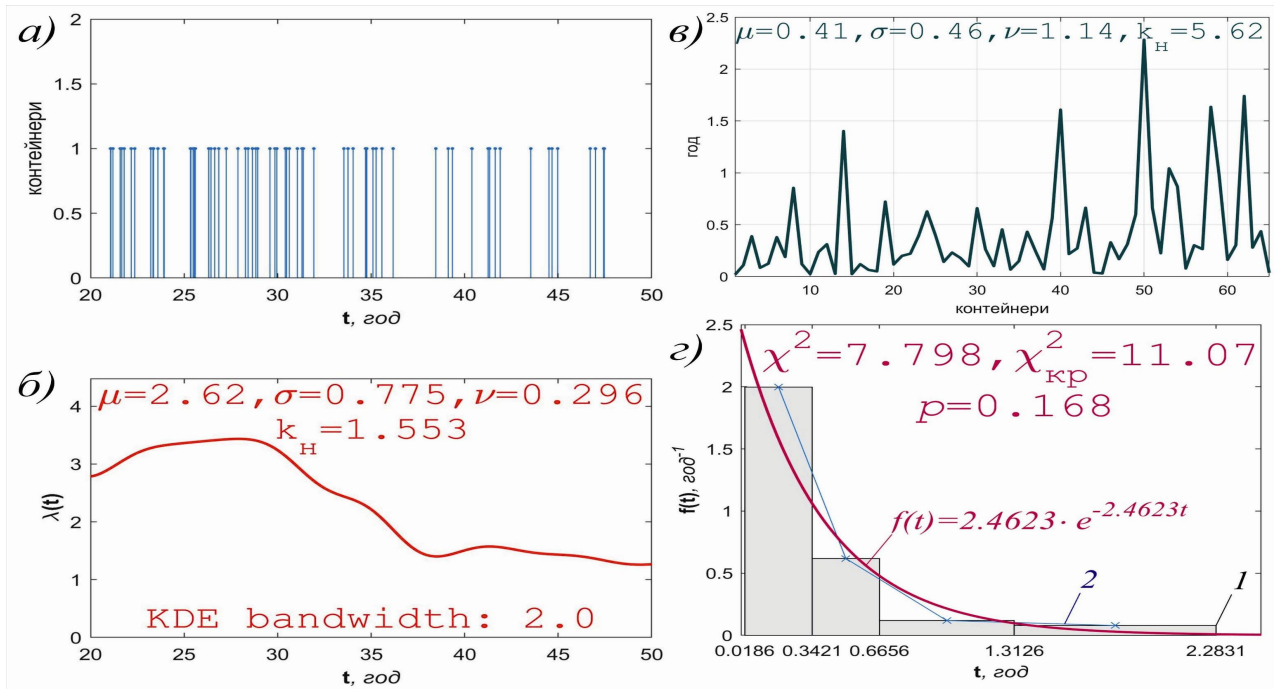


Рисунок 19 – Дослідження термінального контейнеропотоку: а) контейнеропотік у вигляді часового точкового процесу б) функція інтенсивності в) графік часових інтервалів між послідовними подіями надходження контейнерів г) статистична гістограма та експоненційний закон розподілу інтервалів часу між надходженнями контейнерів

Аналіз динаміки контейнеропотоків, що виявив їхню нестационарність та відповідність пуассонівському розподілу, створив підґрунтя для удосконалення технології управління процесом залізничної доставки контейнерів до порту на основі розробки оптимізаційної моделі. Цільова функція розробленої моделі представлена критерієм сумарних експлуатаційних витрат, які складаються з елементів витрат, що виникають в ході реалізації технологічного процесу перевезень, таких як, наприклад, витрати, пов'язані з простоєм контейнерів в процесі накопичення контейнерних партій, витрати, пов'язані з відправленням неповноскладених поїздів та поїздів понаднормової довжини, витрати, пов'язані зі штрафними санкціями за неперед'явлення контейнерів; витрати, пов'язані з ризиком затримки судна з вини залізничного перевізника, спричиненої в першу чергу внаслідок стохастичної складової процесу просування поїздів на залізничною мережею:

$$\begin{aligned}
 F(\{t_1, t_2 \dots t_n\}, \{\lambda_1^*(t), \lambda_2^*(t) \dots \lambda_n^*(t)\}, \{\theta_1, \theta_2 \dots \theta_n\}) = & c^{\kappa_2} \sum_{i=1}^{N^{mep}} \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) (t_i - t) dt + \\
 \sum_{i=1}^{N^{mep}} \left( \left( m_i - \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt \right) \left( m_i > \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt \right) \frac{c_i^{\kappa_n}}{m_i} \right) + & c^{\delta_6} \sum_{i=1}^{N^{mep}} \left( \left( \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt - m_i \right) \left( \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt > m_i \right) \right) + , \quad (9) \\
 + c^{\mu_n} \left( n^{\phi p} - \sum_{i=1}^{N^{mep}} \int_{\tau_0}^{t_i} \lambda_i^*(t) dt \right) + c^{\varepsilon c} \left( 1 - \prod_{i=1}^{N^{mep}} \left( 1 - \sum_{j=1}^{k_i} \frac{e^{-\lambda_i (T^c - \tau^{нас} - t_i)} (\lambda_i \cdot (T^c - \tau^{нас} - t_i))^j}{j!} \right) \right) & \rightarrow \min
 \end{aligned}$$

де  $N^{тер}$  – кількість термінальних станцій формування контейнерних поїздів;  $c^{к2}$  – вартість контейнеродиниці простою (враховуючи перебування на майданчику залізничної станції);  $\lambda_i^*(t)$  – функція умовної інтенсивності нестационарного випадкового потоку надходження контейнерів до  $i$ -ої термінальної станції;  $t_i$  – змінна, що представляє момент часу завершення процесу накопичення контейнерної партії на  $i$ -ій термінальній станції;  $t$  – абстрактна змінна поточного часу;  $m_i$  – норма кількості фітінгових платформ та відповідної кількості контейнерів в 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;  $c^{об}$  – питомі додаткові витрати, що припадають на кожен вагон, який причеплений до контейнерного поїзда поза нормою кількості вагонів;  $n^{фр}$  – 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;  $c^{зб}$  – величина матеріального або фінансового збитку;  $\gamma(\dots)$  – нижня неповна гамма-функція;  $k_i$  та  $\lambda_i$  – відповідно параметр ступеня (або форми) та параметр інтенсивності закону розподілу Ерланга, якому підпорядковується величина тривалості маршруту контейнерного поїзда, що прямує від  $i$ -ої термінальної станції до порту; 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 величин тривалостей просування контейнерних поїздів (представлених підмножинами параметрів) між відповідними термінальними залізничними станціями і портом.

Окрім цільових функцій, модель у своєму складі також містить систему обмежень для забезпечення дотримання технологічних вимог перевізного процесу. Для моделювання тривалості просування контейнерних поїздів використовувався закон розподілу Ерланга, як такий, що адекватно моделює даний процес.

На основі розробленої моделі та методів прогнозування розроблена комплексна процедура управління процесом формування регіональних прямих контейнерних поїздів (рисунок 20). В результаті моделювання на абстрактному полігоні, що налічував 2 термінальні залізничні станції, було побудовано графічне зображення поверхні цільової функції (рисунок 21) та отриманий вектор, рішення, який містить визначені оптимальні моменти часів закінчення накопичення контейнерних партій по кожній з термінальних станцій. Також на рисунку 21 вказана відповідна прогнозна чисельність контейнерних партій.

Запропонована модель спрямована на виведення на новий рівень технології оперативного планування завдяки введенню одночасного управління процесом накопичення контейнерних партій та формуванню поїздів на декількох терміналах, використовуючи прогнози інтенсивності контейнеропотоків.

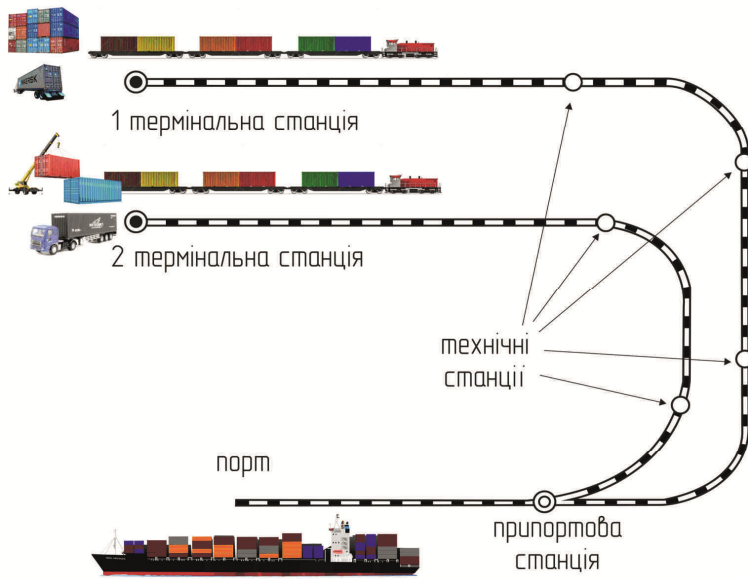


Рисунок 20 – Схема процесу накопичення і доставки контейнерних партій до порту

Її ключова мета — забезпечити скоординоване завершення формування партій на кожному з терміналів таким чином, щоб компенсувати можливі коливання обсягів накопичених контейнерних партій між ними та гарантовано своєчасно доставити узгоджені відправлення до портів. Такий підхід дозволяє досягти системного ефекту та мінімізувати затримки, спричинені як волатильністю термінальних контейнеропотоків так і стохастичною складовою процесів просування поїздів.

У восьмому розділі проведено аналіз проблем взаємодії видів транспорту в контексті інтермодальних контейнерних перевезень, зокрема таких, як перевантаженість контейнерних терміналів та недостатня пропускна спроможність автодоріг, особливо в міських припортових зонах. Обґрунтовано необхідність підвищення ступеня залученості залізничного транспорту до систем інтермодальних контейнерних перевезень і особливо на тих сегментах ринку де традиційно домінує автомобільний транспорт.

Розроблено теоретичні основи технології швидкої доставки контейнерів, здатної конкурувати з автомобільним транспортом на середніх і коротких відстанях, включаючи "останню милю". Основу цієї технології становлять мобільні модульні контейнерні поїзди типу CargoSprinter та автоматичні вантажні системи MetroCargo. CargoSprinter вирізняється високою мобільністю, що дозволяє йому безпосередньо заїжджати на під'їзні колії підприємств, усуваючи потребу у використанні маневрових локомотивів і кардинально скорочуючи час на маневрові операції. Це значно підвищує ефективність залізничного транспорту навіть за умов нестабільних графіків роботи вантажних районів або зайнятості фронтів. Системи MetroCargo забезпечують пряме перевантаження контейнерів між залізничним транспортом і суднами, виключаючи необхідність використання додаткових засобів, таких як річстакери, і усуваючи потребу в оренді припортових майданчиків і контейнерних терміналів. Це зменшує експлуатаційні витрати, скорочує час перевантаження і дозволяє оптимізувати взаємодію між різними видами

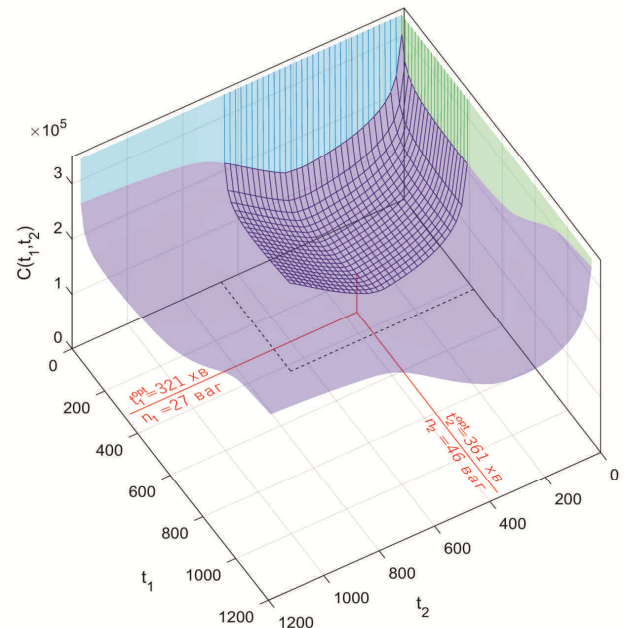


Рисунок 21 – Цільова функція і вектор оптимального рішення

транспорту. Запропоновані теоретичні рішення створюють основу для впровадження технології, яка може ефективно конкурувати з автомобільним транспортом навіть у найскладніших сегментах перевезень. Однак взаємодія залізничного оператора з вантажними фронтами підприємств ускладнена впливом факторів невизначеності, зумовлених варіативністю тривалості вантажних операцій та нестабільністю графіків роботи вантажних фронтів, тобто їх "вікон доступності".

Тому ключовим елементом даної технології є модель оперативного планування роботи модульних поїздів. Дану модель можна класифікувати як модель змішаної комбінаторної робастної оптимізації. Робастність моделі досягається за допомогою принципу мінімакса, що дозволяє знаходити надійні рішення, які залишаються ефективними навіть у найгірших сценаріях розвитку подій. Цільова функція моделі, що відображає сумарні експлуатаційні витрати, сформульована наступним чином:

$$\begin{aligned}
 F(A, x^A, n, T, \tau', \tau'', t^{\text{вант}}) = & \\
 \min_{(x^A, n, T)} \left\{ \max_{(\tau', \tau'', t^{\text{вант}})} \left\{ e_{nk} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{|x_i^A|} d \left( s \left( x_{i,j-1}^A, \sum_{k=1}^{j-1} \mathbb{I}(x_{i,k}^A = x_{i,j-1}^A) \right), s \left( x_{i,j}^A, \sum_{k=1}^j \mathbb{I}(x_{i,k}^A = x_{i,j}^A) \right) \right) \right\} + & \\
 e_{\text{доо}} n + e_{nc} \sum_{i=1}^n \left( \bigoplus_{j=1}^{|x_i^A|} (T_i(j=1) + t_{i,j-1}^{\text{вант}}(j>1) + t_{i,j-1,j}^{np}, \tau'_{i,j}) \right) + & \quad (10) \\
 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{|x_i^A|} q_{x_{i,j}^A} e^{u_{x_{i,j}^A}} \cdot \mathbb{I} \left( \left( \bigoplus_{j=1}^{|x_i^A|} (T_i \cdot \mathbb{I}(j=1) + t_{i,j-1}^{\text{вант}} \cdot \mathbb{I}(j>1) + t_{i,j-1,j}^{np}, \tau'_{i,j}) \right) > \tau''_{i,j} \right) + & \\
 + e_{\text{кмк}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{|x_i^A|} \left( \left( q_i^{\text{max}} - \sum_{l=1}^j q_{x_{i,l}^A} \mathbb{Q} \left( \sum_{k=1}^j \mathbb{I}(x_{i,k}^A = x_{i,l}^A) \right) \right) d \left( s \left( x_{i,j-1}^A, \sum_{k=1}^{j-1} \mathbb{I}(x_{i,k}^A = x_{i,j-1}^A) \right), s \left( x_{i,j}^A, \sum_{k=1}^j \mathbb{I}(x_{i,k}^A = x_{i,j}^A) \right) \right) \right) \right\} &
 \end{aligned}$$

де  $A$  – множина замовлень на перевезення контейнерів;  $x^A$  – змінна послідовність, яка визначає порядок здійснення операцій по обслуговуванню замовлень і яка утворена на основі множини  $A$ , вона містить номери всіх замовлень, кожен з яких зустрічається по 2 рази, що відповідає операціям завантаження і вивантаження контейнерів відповідно;  $n$  – змінна поточна кількість модульних поїздів, які розглядаються в якості виконавців замовлень;  $T$  – змінний вектор моментів часу початку виконання замовлень на перевезення модульними контейнерними поїздами;  $\tau', \tau''$  – множини послідовностей поточних реалізацій інтервальних чисел, які відповідно представляють моменти часів початку і закінчення роботи вантажних фронтів по маршрутах слідування модульних поїздів;  $t^{\text{вант}}$  – множина послідовностей поточних реалізацій інтервальних чисел, які представляють тривалості вантажних операцій на вантажних фронтах при обслуговуванні замовлень по маршрутах кожного з модульних поїздів;  $|x_i^A|$  – довжина (кількість елементів) підпослідовності  $x_i^A$ , яка утворена з послідовності  $x$  шляхом видалення всіх елементів, які містять номери замовлень, окрім тих, що призначені до виконання  $i$ -им поїздом, дана послідовність визначає порядок всіх операцій, що виконує  $i$ -ий поїзд, в тому числі визначає його маршрут слідування і порядок завантаження і розвантаження замовлень;  $s(a, b)$  – функція, що повертає номер

станції (або вантажного фронту) в залежності від аргументів  $a$  і  $b$ , де  $a$  – це номер замовлення а  $b$  – це тип операції з ним (1 – завантаження, 2 – розвантаження);  $d(s_1, s_2)$  – функція, що повертає відстань по залізничній мережі між станціями (або вантажними фронтами)  $s_1$  та  $s_2$ ;  $e_{нк}$  – вартість поїздокілометра;  $e_{нз}$  – вартість поїздогодини;  $e_{кмк}$  – вартість порожнього пробігу контейнеро-місцекілометра;  $e_{x_j^A}$  – величина штрафу за несвоєчасне надання одного контейнера до вантажного фронту (або інших збитків) при виконанні замовлення, номер якого містить елемент підпоследовності  $x_{i,j}^A$ ;  $e_{доод}$  – додаткові витрати, що пов'язані з включенням модульного поїзда до плану перевезень (виклик додаткової поїзної бригади, екіпірування, проведення ТО тощо);  $x_{i,j}^A$  –  $j$ -ий елемент підпоследовності  $x_i^A$ , тобто підпоследовності виконання операцій  $i$ -им поїздом, який містить номер замовлення, з яким виконується  $j$ -та операція, тип операції (завантаження або вивантаження) визначається кількістю разів входження номера замовлення в дану підпоследовність до  $j$ -го елемента включно, якщо номер зустрічається вперше, це є ознакою операції завантаження, якщо вдруге – це операція вивантаження, але кожна з цих операцій повинна виконуватись на відповідній до замовлення станції (або вантажному фронті);  $t_{i,j}^{сант}$  – елемент последовності, (яка в свою чергу є елементом множини  $t^{сант}$ ), який містить поточну реалізацію інтервального числа, що представляє тривалість відповідної  $j$ -ої вантажної операції  $i$ -го модульного поїзда;  $t_{i,j-1,j}^{мп}$  – тривалість просування модульного поїзда між  $(j-1)$ -ою та  $j$ -ою станціями (або вантажними фронтами) його маршруту;  $q_i^{\max}$  – нормативна (максимальна) контейнеромісткість  $i$ -го модульного поїзда;  $q_{x_{i,j}^A}$  – кількість контейнерів замовлення, номер якого містить  $j$ -ий елемент підпоследовності  $x_i^A$ ;  $T_i$  – змінний момент часу початку виконання замовлень на перевезення  $i$ -им модульним поїздом;  $\tau'_{i,j}$  – поточна реалізація значення інтервального числа, яке представляє змінний момент часу початку роботи  $j$ -го вантажного фронту на маршруті  $i$ -го поїзда;  $\tau''_{i,j}$  – поточна реалізація значення інтервального числа, яке представляє змінний момент часу закінчення роботи  $j$ -го вантажного фронту на маршруті  $i$ -го поїзда;  $\bigoplus_{j=1}^{|x_i^A|}(\dots)$  – агрегуюча операція максимуму;  $\mathbb{I}(\dots)$  – індикаторна функція, яка повертає значення 1, якщо її операнд приймає значення "правда", і 0 в іншому випадку;  $\mathbb{Q}(\dots)$  – функція визначення напрямку зміни кількості контейнерів у складі поїзда, її можна визначити наступним чином:

$$\mathbb{Q}(y) = \begin{cases} 1 & , \text{ якщо } y = 1 \\ -1 & , \text{ якщо } y = 2 \end{cases} \quad (11)$$

отже аргумент даної функції представляє тип вантажної операції, що прийнятий в рамках даної моделі: 1 – завантаження, 2 – вивантаження, таким чином дана функція визначає – слід додати кількість контейнерів, які відповідають певному замовленню, до складу модульного поїзда чи навпаки відняти цю кількість

контейнерів від складу поїзда, відповідно до виду вантажної операції.

Перший компонент функції враховує витрати на переміщення поїздів. Другий – додаткові витрати, пов'язані з введенням поїзда до плану перевезень, зокрема виклик бригади, екіпірування та технічне обслуговування. Третій компонент охоплює витрати, пов'язані з часом перевезення, очікуванням і вантажними операціями. Наприклад, витрати на паливо обчислюються за поїздокілометрами, а заробітна плата бригад — за поїздо-годинами, що відповідає бухгалтерському поділу витрат за статтями та принципам методу витратних ставок. Четвертий компонент враховує штрафи за затримку доставки або несвоєчасне подання поїзда на вантажний фронт. Наприклад, несвоєчасна доставка контейнерів до порту може спричинити затримку судна, демаредж або штрафи за резервування перевізних потужностей тощо. П'ятий компонент враховує витрати через пробіг порожніх контейнерів, що підвищує середню собівартість перевезення. Цей компонент виконує роль штрафної функції, стимулюючи ефективніше використання рухомого складу. З метою оптимізації моделі було запропоновано метод, основу якого представляє спеціально розроблений двоконтурний генетичний алгоритм. Схему запропонованого алгоритму показано на рисунку 22.

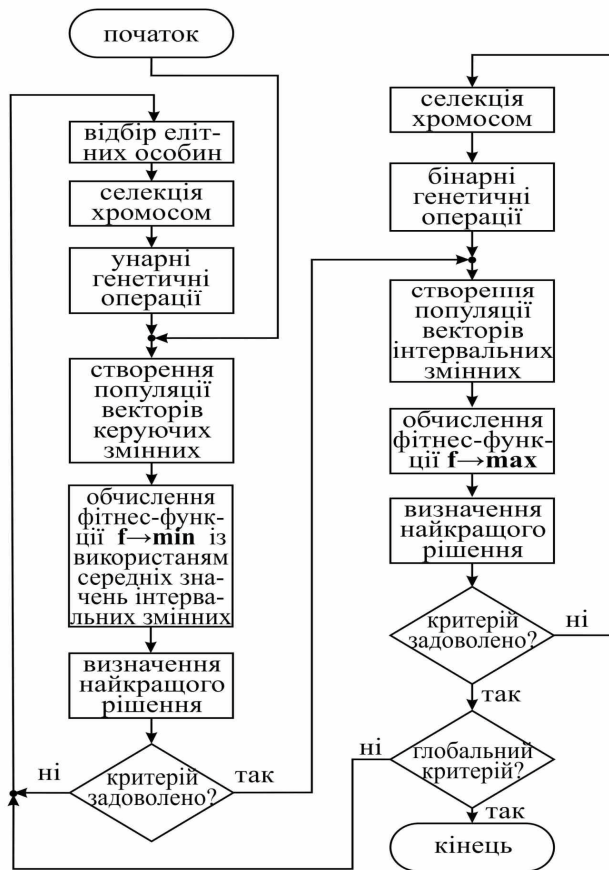


Рисунок 22 – Схема двоконтурного алгоритму для оптимізації комбінаторної робастної моделі

Він передбачає використання двох рівнів ГА. Зовнішній ГА відповідає за пошук оптимальних значень вектора керуючих змінних, які призводять до мінімізації витрат і, відповідно, зменшення цільової функції, що формується через функцію fitness ГА. Внутрішній ГА, в свою чергу, спеціалізується на пошуку значень вектора інтервальних змінних, які представляють тривалості виконання операцій та моделюють найбільш несприятливі сценарії для конкретного набору керуючих змінних.

Даний алгоритм є достатньо універсальним і може використовуватись для оптимізації й інших моделей такого класу, адже існуючі аналітичні методи робастної оптимізації є дуже малочисельними і дуже складними у застосуванні, а головне – існуючі алгоритми придатні лише для оптимізації моделей із диференційованими цільовими функціями, тобто вони непридатні для застосування із моделями комбінаторного класу.



В результаті оптимізації моделі було отримано оперативний план роботи у вигляді контактного графіка, який для кожного модульного поїзда визначає місце, час, тривалість і зміст кожної операції взаємодії (рисунок 24).

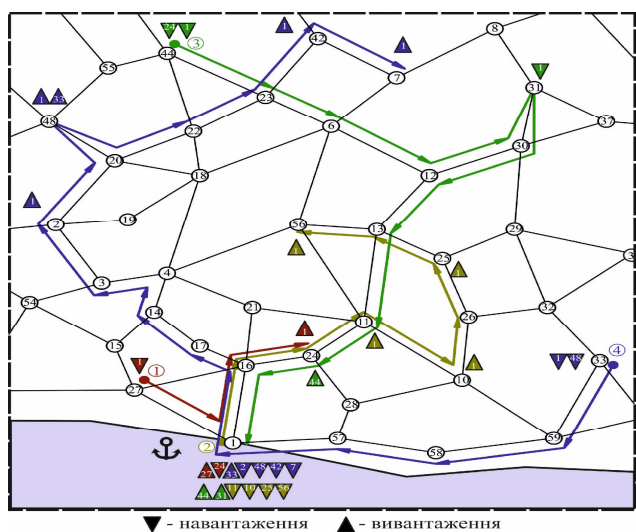


Рисунок 23 – Схема полігону і оперативний план роботи системи доставки контейнерів з наведеними маршрутами руху модульних поїздів

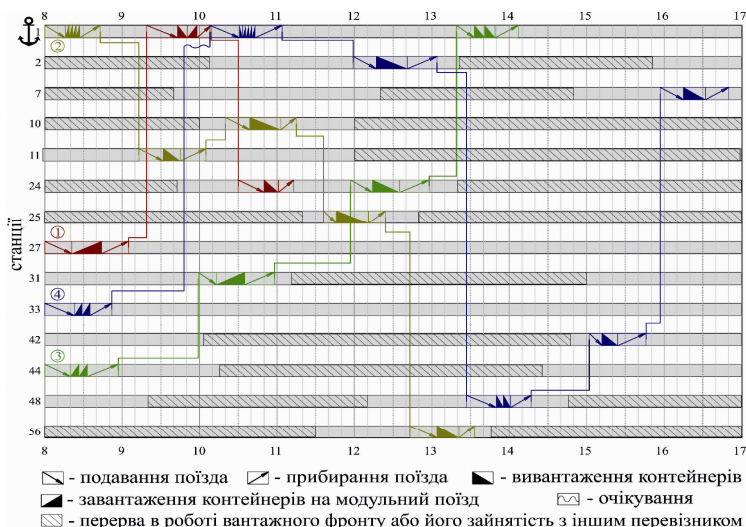


Рисунок 24 – Оперативний план роботи системи швидкої доставки контейнерів у вигляді контактного графіку взаємодії модульних поїздів з вантажними пунктами

Результати моделювання підтверджують високу ефективність розробленої моделі оперативного управління системою швидкої залізничної доставки контейнерів. Хоча витрати за робастним варіантом плану на 6,5% вищі, ніж у випадку ситуативного оптимального плану, це виправданий компроміс, оскільки модель дозволяє значно знизити ризики, пов'язані з непередбачуваними змінами в умовах експлуатації, такими як зміщення графіків або затримки на вантажних фронтах. Завдяки цьому досягається баланс між економічною ефективністю та стійкістю в умовах невизначеності, що дозволяє мінімізувати потенційні фінансові втрати і забезпечити ефективне використання ресурсів навіть у найгірших сценаріях. На основі економічних розрахунків доведено доцільність впровадження нової технології, яка має високу норму дохідності, короткий період окупності інвестицій та значний потенціал для підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту.

## ВИСНОВКИ

Проведено детальний аналіз ключових аспектів управління ризиками та невизначеністю в контексті експлуатаційної діяльності залізничного транспорту. Цей аналіз включав онтологічне дослідження понять невизначеності та ризику.

Також було проведено ідентифікацію факторів невизначеності в контексті управління експлуатаційною роботою, що дозволило виділити 2 основних класи цих факторів, такі як алеаторні та епістемічні, та виявити основні джерела невизначеності, такі як непередбачуваність транспортних потоків, недостатність даних, спотворення інформації, випадкові відмови, людський фактор, похибки моделей, важкопередбачувані зміни ринкової кон'юнктури, правових та економічних взаємовідносин тощо.

Аналіз наукових статей, присвячених управлінню експлуатаційною роботою залізничних систем, підтверджує важливість і актуальність досліджень у сфері управління в умовах невизначеностей і ризиків. Проблема невизначеності та ризиків є критичною, оскільки безпосередньо впливає на ефективність, безпеку та надійність транспортних операцій. За результатами аналізу вітчизняних та закордонних досліджень були виокремлені кілька загальних недоліків, які потребують подальшого опрацювання. По-перше, більшість досліджень не забезпечують єдиного підходу до управління ризиками та невизначеністю, що ускладнює порівняння та адаптацію результатів до конкретних умов. По-друге, деякі роботи недостатньо враховують широкий спектр випадкових факторів, таких як сезонність та зміни в пасажирському попиті.

Окрім того було встановлено, що існуючі математичні моделі часто мають обмеження у прогнозуванні та адаптації до швидко змінюваних умов протікання технологічних процесів та оперативної обстановки, що в свою чергу підтверджує необхідність розробки більш комплексних і універсальних підходів до управління невизначеністю та ризиками.

Аналіз експлуатаційної діяльності залізничної системи України показав, що її сучасний стан відзначається негативними тенденціями у зменшенні обсягів перевезень, що посилюється через військові конфлікти і інші зовнішні фактори.

Крім того в ході дослідження в тому числі було виявлено негативні тенденції до погіршення багатьох кількісних і якісних показників експлуатаційної роботи, зокрема збільшення середньої тривалості обігу вантажного вагону, зменшення чисельності маневрових локомотивів, зростання штрафів за несвоєчасну доставку вантажів тощо.

Однак такі тенденції відбуваються попри те, що останніми роками формально значно покращилось інформаційне забезпечення управлінського процесу, що в свою чергу свідчить про те, що самі підходи і технології управління експлуатаційною роботою, які були розроблені ще за часів планової економіки, є певною мірою застарілими і не можуть забезпечити перехід на адаптивні логістичні моделі управління особливо в умовах ринкового середовища, якому притаманні високі рівні невизначеності та ризиків на фоні постійного підвищення вимог до якості транспортної продукції.

З метою оцінки якості інформаційного забезпечення управлінського процесу був здійснений аналіз зразків даних, які зберігаються в системі АСК УЗ Є та використовуються для вироблення рішень в сфері управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту України. Використані новітні методи аналізу, такі як вейвлет-спектрограма та R/S-аналіз, метод кросс-вейвлет аналізу, регресійно-кореляційні методи та методи аналізу чутливості тощо. В ході аналізу було встановлено, що істотні невизначеності даних пов'язані головним чином не з похибками механізмів збору та зберігання інформації, а в першу чергу з природною волатильністю та стохастичністю транспортних процесів.

Загалом, результати дослідження підтвердили необхідність системних змін в управлінських підходах та технологіях для підвищення ефективності експлуатаційної роботи залізничного транспорту в умовах високоволатильного середовища.

На прикладі класичних задач управління експлуатаційною роботою були продемонстровані підходи щодо зниження рівня невизначеностей як епістемічного, так і алеаторного типу, рівень яких стає дедалі вищим в сучасних умовах. Зокрема на прикладі задачі розрахунку ПФП було доведено ефективність такого підходу, як уточнення управлінських моделей. Задачу розрахунку ПФП формалізовано у вигляді оптимізаційної моделі, яка реалізує уточнення цільового критерію, за рахунок урахування залежності витрат вагоно-годин на переробку вагонопотоків від рівня завантаженості сортувальної станції. Таким чином уточнення моделі дозволило знизити реальні технологічні витрати на 405,71 вагоно-годин, що відповідає 3,5% від загальних витрат на накопичення та переформування поїздів.

Вирішена задача планування місцевої роботи на залізничній дільниці в умовах невизначеності, обумовленої коливаннями обсягів місцевої роботи по станціях дільниці. З цією метою вирішення даної задачі було реалізоване за допомогою розробленої математичної моделі стохастичної робастної оптимізації. Обсяги місцевої роботи в рамках цієї моделі було запропоновано представляти за допомогою стохастичних інтервальних чисел, які використовують статистичні дискретні розподіли імовірності. У разі відсутності статистичних даних для представлення стохастичних змінних було запропоноване використання біноміального розподілу. В ході моделювання було доведено ефективність використання запропонованої моделі в умовах невизначеності.

Також, виходячи з вищезазначеної необхідності системних змін в управлінських підходах та технологіях, було розроблено нейромережеву модель визначення пріоритетності обробки вагонів, що несуть потенційний ризик затримок, яка враховує параметри вагона, такі як поточні затримка, залишковий час слідування і провізна плата. Незважаючи на компактність, модель виявилася недостатньо гнучкою для сучасних умов і вимог до СППР.

Тому було розроблено новий підхід на основі ТДШ, який дозволяє враховувати нечітку і навіть суперечливу інформацію, поєднуючи дані з різних джерел. Це дозволяє максимально врахувати всю наявну інформацію і таким чином зменшити невизначеність при оцінці ризиків і підвищити точність прогнозів. У контексті моделювання ризиків була запропонована функція щільності ризику, яка визначається як добуток мас-функції впевненості у затримці та штрафної функції, яка може залежати від тривалості затримки в тому числі і нелінійно.

Реалізація даного підходу біла втілена у математичній моделі векторної оптимізації. Модель призначена для оперативного планування роботи ТС і включає дві цільові функції: сумарні експлуатаційні витрати і ризик затримки доставки вантажів. Результати моделювання показали значне зниження рівня ризику на 62,4% та одночасно зменшення експлуатаційних витрат на 7,99%.

Вирішена задача оптимізації перевезень на напрямку, на якому швидкісні поїзди використовуються в якості проміжного інтермодального транспорту в системі туристичних перевезень. Створена модель нечіткого логічного виведення (FIS), що моделює функцію корисності, яка формалізує прийняття рішення про здійснення подорожі, частково нівелюючи невизначеність, що пов'язані з суб'єктивним сприйняттям факторів вибору, таких як час подорожі, доступність станції, вартість квитка тощо.

Розроблено оптимізаційну модель цілочисельного програмування, яка реалізовує технологію пропуску зупинок при плануванні маршрутів швидкісних поїздів на напрямку. Цільовим критерієм моделі є загальний прибуток компанії-оператора. За результатами моделювання було доведено, що такий підхід дозволяє зберегти значну частину потенційного туристичного пасажирського потоку і забезпечити ефективне охоплення пасажирського трафіку між проміжними станціями. Крім того, з метою отримання якісних вихідних даних було розроблено модель прогнозування, яка використовує нейромережеву архітектуру GAN (генеративно-змагальна мережа) і дозволяє зберегти інформацію про зв'язки кореспонденції пасажиропотоків між станціями напрямку, представивши історичні дані у вигляді багатовимірних часових рядів. Похибка прогнозу в середньому не перевищувала 6%.

В ході проведеного аналізу було доведено, що контейнерні перевезення є критично важливими для сучасних глобальних логістичних ланцюгів, і залізничний транспорт забезпечує їхню ефективність, надійність і екологічність. В результаті аналізу із використанням статистичних методів та, зокрема, тестів статистичного аналізу, таких як розширений тест Дікі-Фуллера та тест Квятковського-Філіпса-Шмідта-Шина, було встановлено стохастичний і нестационарний характер контейнеропотоків, що надходять до термінальних залізничних станцій. Це ускладнює планування технологічних операцій і підвищує ризики зриву графіків доставки контейнерів до порту та відповідно застосування різноманітних штрафних санкцій.

Проблема раціоналізації процесу одночасного формування контейнерних поїздів на термінальних залізничних станціях і просування їх до порту була вирішена за рахунок формування математичної моделі стохастичної оптимізації, що враховує не лише різноманітні технологічні витрати, але й ризики, пов'язані із запізненням прибуття контейнерів і заповненням зафрахтованих контейнеромісць. Модель враховує імовірнісні складові, пов'язані не лише з параметрами контейнеропотоків але й тривалістю просування поїздів залізничною мережею в бік порту, враховуючи проходження обробки на технічних станціях. Модель також враховує можливість формування як неповносоставних поїздів так і поїздів з понаднормовою кількістю вагонів, що є важливим для ефективної роботи термінальних станцій і зменшення експлуатаційних витрат.

Запропонована модель завдяки застосуванню підходів теорій випадкових потоків та часових точкових процесів дозволяє мінімізувати негативний вплив факторів невизначеності і ризику в процесі формування і просування контейнерних поїздів у складі функціонування інтермодальних систем. В результаті моделювання було доведено, що дана модель забезпечує зниження експлуатаційних витрат і підвищення ефективності контейнерних перевезень, що є важливим для успішної інтеграції залізничного транспорту в глобальні логістичні системи.

З метою набуття залізничним транспортом критичної переваги в конкурентній боротьбі в сегменті ринку перевезень контейнерних перевезень на середні і короткі відстані в рамках систем інтермодальних перевезень була розроблена технологія швидкої доставки контейнерів із застосуванням залізничного транспорту. Дана технологія зокрема передбачає щільну інтеграцію

залізниці і портової інфраструктури завдяки застосуванню автоматичних вантажних систем MetroCargo™, а також підвищення швидкості і мобільності залізничного транспорту завдяки застосуванню модульних контейнерних поїздів типу CargoSprinter. Ключовим моментом технології є розроблена модель управління, яка представляє собою математичну модель змішаної комбінаторної робастної оптимізації, цільова функція якої представлена критерієм експлуатаційних витрат. Модель планує роботу модульних поїздів, які фактично курсують в кур'єрському режимі. Реалізуючи принцип мінімакса дана модель забезпечує робастність отриманого рішення зменшуючи негативний вплив факторів невизначеності, пов'язаний з недостатністю інформації та мінливістю границь "вікон" доступності вантажних фронтів підприємств-вантажоотримувачів і вантажовідправників.

З метою уникнення непомірних обсягів обчислень, пов'язаних з робастною постановкою задачі, була розроблена спеціальна процедура оптимізації на основі запропонованого двохконтурного генетичного алгоритму, внутрішній і зовнішній контури якого забезпечують відповідно максимізацію і мінімізацію цільової функції.

За результатами моделювання було встановлено, що витрати робастного плану перевищують витрати оптимального плану зі сталими вихідними даними всього лише на 6,5%, що є прийнятною платою за робастність, яка у той же час компенсується можливістю оперативно реагувати на непередбачувані зміни, уникаючи значних затримок та збитків.

Економічний ефект від впровадження даної технології виникає завдяки перерозподілу транспортного ринку і відповідного збільшення прибутку залізничного оператора контейнерної доставки. Для полігону з початковим обігом відповідного ринку контейнерних перевезень у 100 мільйонів доларів величина очікуваної чистої приведеної вартості від експлуатації даної технології за 20 років становила 366 мільйонів доларів, очікувана величина внутрішньої норми дохідності на рівні 49,5 %, період окупності – 4,4 року.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Panchenko S.V., Butko T.V., Prokhorchenko A.V., Parkhomenko L.O. Formation of an automated traffic capacity calculation system of rail networks for freight flows of mining and smelting enterprises. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2016. 2. P. 93–99. (видання індексується в базі Scopus, Q3).

2. Пархоменко Л.О., Лавренюк В.О. Розроблення нечіткої моделі прогнозування кореспонденцій пасажирів у швидкісному русі на основі принципів просторової взаємодії. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. 164. С. 15–22.

3. Панченко С.В., Бутко Т.В., Прохоров В.М., Пархоменко Л.О.. Удосконалення технології організації вагонопотоків шляхом формування автоматизованої системи розрахунку і забезпечення виконання плану формування поїздів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. 3. С.136–142.

4. Пархоменко Л.О., Серпокрилов В.Ю., Коваленко Д.М. Аналіз динаміки пасажиропотоків по Україні в умовах швидкісних перевезень. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. (173). С. 143–148.

5. Пархоменко Є.О., Пархоменко Л.О. Формування інформаційно-керуючої системи стратегічного планування швидкісних пасажирських перевезень на залізничному транспорті. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. 5. С. 3–9.

6. Prokhorchenko A., Panchenko A., Parkhomenko L., Nesterenko H., Muzykin M., Prokhorchenko H., Kolisnyk A. Forecasting the estimated time of arrival for a cargo dispatch delivered by a freight train along a railway section. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 3/3(99). P. 30–38. (видання індексується в базі Scopus, Q3).

7. Butko T., Kostiennikov O., Parkhomenko L., Prokhorov V., Bogomazova G. Forming an automated technology to manage freight transportation along a direction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 1/13(97) P.6-13| DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156098 (видання індексується в базі Scopus, Q3).

8. 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(103). P. 6–12. (видання індексується в базі Scopus, Q3).

9. Butko T.V., Prokhorov V.M., Parkhomenko L.O., Prokopov A.O. Improvement of technology of passenger intermodal transportation with involvement of railway transport in the conditions of tourism development. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2021, № 1 (91). P. 37–50. DOI: 10.15802/stp2021/228106

10. Пархоменко Л.О., Прохоров В.М., Калашнікова Т.Ю., Галуцька А.О., Шешеня І.І. Розробка процедури формування схеми маршрутів поїздів для автоматизованої системи управління швидкісними пасажирськими перевезеннями. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. 3(26). С. 18–26.

11. Parkhomenko L., Butko T., Prokhorov V., Kalashnikova T., Golovko, T. Building a model for planning rapid delivery of containers by rail under the conditions of intermodal transportation based on robust optimization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. 5/3(119), P. 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265668>(видання індексується в базі Scopus, Q3).

12. Бутько Т.В., Пархоменко Л.О., Топчій А.В. Формалізація технології функціонування сортувальної станції на основі ризик-менеджменту. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2022. 4. С. 28–32.

13. Бутько Т.В., Пархоменко Л.О., Тарасов К.О., Гайдук Д.А. Формалізація процедури надання альтернативного маршруту швидкісним пасажирським поїздам на основі ризик-менеджменту. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2023. 1. P. 31–37. DOI: 10.18664/ikszt.v28i1.276341

14. Пархоменко Л.О., Прохоров В.М., Калашнікова Т.Ю., Шандер О.Е. Розроблення СППР для управління процесом формування контейнерних поїздів у

рамках системи інтермодальних перевезень. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 3. С. 29–42. DOI: 10.18664/iksz.v28i3.290142

15. Бутько Т.В., Пархоменко Л.О., Артемов Е.М., Лагно О.С. Методи організації вантажних залізничних перевезень на основі ризик-орієнтованих технологій. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 4. С. 38–45. DOI: 10.18664/iksz.v28i4.296468

16. Пархоменко Л.О., Прохоров В.М., Калашнікова Т.Ю., Овсянніков Д.О. Формування моделі управління пріоритетністю обробки вагонів на технічних станціях в умовах невизначеності. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 1. С. 45–54.

17. Пархоменко Л.О., Прохоров В.М., Калашнікова Т.Ю., Кофанов О.В. Формування моделі ризику в задачі забезпечення дотримання строку доставки вантажів в умовах невизначеності із використанням теорії нечітких множин та теорії Демпстера-Шафера. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 2. С. 81–90.

18. Пархоменко Л.О., Прохоров В.М. Уточнення моделі розрахунку плану формування поїздів за рахунок урахування ефекту навантаженості сортувальних станцій. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2024. №48. С. 193–205.

19. Пархоменко Л.О., Прохоров В.М., Калашнікова Т.Ю. Удосконалення технології управління місцевою роботою дільниці в умовах невизначеності на основі робастної оптимізації. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 3. С. 3–12.

**Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:**

20. Панченко С.В., Бутько Т.В., Пархоменко Л.О., Прохорченко Г.О. Формування автоматизованої системи розрахунку графіку руху поїздів на сітьовому рівні. Інновації інфраструктури транспортно-логістичних систем. Проблеми, досвід, перспективи : збірник тез конференції (11-17 квітня 2016 р. м. Трускавець). Сєверодонецьк, 2016. С. 137–138.

21. Пархоменко Л.О., Грицай В.О. Удосконалення технології роботи станції в частині покращення організації обслуговування пасажирів. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2018. № 4 (додаток). С. 80.

22. Prokhorchenko A., Parkhomenko L., Kuman A., Matsiuk V., Stepanova J. Improvement of the technology of accelerated passage of low-capacity car traffic on the basis of scheduling of grouped trains of operational purpose. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 149. P. 86–94. (індексується в базі Scopus).

23. Parkhomenko L., Viznyak R., Skurikhin D., Eiduks J. Railway-Ferry Crossings of Ukraine and Baltics as an Efficient Link of the Baltic-Black Sea Transport Corridor. *Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. ICTE in Transportation and Logistics 2019*, Springer, 2020. 171–179. (індексується в базі Scopus).

24. Lavrukhin L., Kravets A., Parkhomenko L., Kulova D., Panchenko A., Ivaskovska N. Improving the quality of railway operation to extend the services of transportation of cargo of small volume. *Lecture Notes in Intelligent Transportation and*

Infrastructure. ICTE in Transportation and Logistics 2019, Springer, 2020. 35–43. [https:// DOI 10.1007/978-3-030-39688-6\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_6) (індексується в базі Scopus).

25. Пархоменко Л.О., Чехунов Д.М. Дослідження показників вантажних перевезень в контексті обробки вагонопотоків із небезпечними вантажами. Матеріали міжнародної науково-практичної Internet-конференції «Моделювання та інформаційні технології в науці, техніці та освіті» (21–22 листопада 2018 р.) Харків. 2018. С. 171–177. DOI 10.1016/j.procs.2019.01.111

26. Parkhomenko L., Khodakivskyi O., Khodakivska Y., Kuzmenko O., Pakalnis A. Improvement of the organization of operation of the Ukrainian railway transport on the basis of the idea of unification of the automated freight and passenger transportation control system. "Transport Means" – Proceedings of the International Conference (October 2019). Kaunas University of Technology. 2019. P. 859–861. (індексується в базі Scopus).

27. Бутько Т.В., Колісник А.В., Пархоменко Л.О. Удосконалення організації взаємодії залізничних вузлів та портів при контейнерних перевезеннях. Тези доповідей 1-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології» (Трускавець-Харків, 24-30 січня 2020 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2020. С.13.

28. Пархоменко Л. О., Калашнікова Т. Ю., Прохоров В. М. Підвищення інтероперабельності залізничної транспортної системи України при здійсненні інтермодальних контейнерних перевезень на основі технології Metrocargo™. The 4th International scientific and practical conference “Innovations and prospects of world science” (December 1-3, 2021) Perfect Publishing, Vancouver, Canada. 2021. С. 312–317.

29. Бутько Т.В., Прохоров В.М., Пархоменко Л.О., Прокопов А.О. Перспективи розвитку вантажних інтермодальних перевезень в Україні з точки зору побудови нових залізничних шляхів з Європейською шириною колії. Тези доповідей 2-ої міжнародної міжнародної науково-технічної конференції "Інтелектуальні транспортні технології", ІТТ. 2021. (Харків, 27–29 квітня 2021 р.), Харків, 2021. С. 19–21.

30. Пархоменко Л.О., Мансурова З. Удосконалення технології роботи залізничного і морського транспорту на засадах логістики. Тези доповідей 3-ої міжнародної міжнародної науково-технічної конференції "Інтелектуальні транспортні технології", ІТТ. 2022. (Харків, 22–23 листопада 2022 р), Харків, 2022. С. 58–59.

31. Пархоменко Л.О., Коваль В.В. Удосконалення технологічної роботи приміського залізничного транспорту на основі взаємодії с міським транспортом. Тези доповідей 3-ої міжнародної міжнародної науково-технічної конференції "Інтелектуальні транспортні технології", ІТТ. 2022. (Харків, 22–23 листопада 2022 р), Харків, 2022. С. 56–57.

32. Пархоменко Л.О., Маслов М.К. Удосконалення роботи прикордонної сортувальної станції при перевезенні небезпечних. Тези доповідей 3-ої міжнародної міжнародної науково-технічної конференції "Інтелектуальні транспортні технології", ІТТ. 2022. (Харків, 22–23 листопада 2022 р), Харків, 2022. С. 57–58.



33. Пархоменко Л.О., Збукарь Д.В., Головка К.Ю., Рябков Б.Д.. Удосконалення технології міжнародних залізничних перевезень на основі сучасних технічних засобів. Тези доповідей 3-ої міжнародної міжнародної науково-технічної конференції "Інтелектуальні транспортні технології", ІТТ. 2022. (Харків, 22–23 листопада 2022 р), Харків, 2022. С. 54–56.

34. Твердохліб Ю., Шатунов Д., Пархоменко Л. Організація роботи сортувальної станції в умовах потенційних ризиків та перевезення небезпечних вантажів. Тези доповідей 4-ої міжнародної міжнародної науково-технічної конференції "Інтелектуальні транспортні технології", ІТТ. 2023. (Харків, 27–28 листопада 2023 р), Харків, 2023. С. 64–65.

35. Кірік О., Глибокий Ю., Пархоменко Л. Організація пасажирського руху в міжнародному сполученні. Тези доповідей 4-ої міжнародної науково-технічної конференції "Інтелектуальні транспортні технології", ІТТ. 2023. (Харків, 27–28 листопада 2023 р), Харків, 2023. С. 44–45.

36. Кудзів М., Овсянніков Д., Пархоменко Л. Удосконалення технології взаємодії залізничного транспорту з морським портом. Тези доповідей 4-ої міжнародної науково-технічної конференції "Інтелектуальні транспортні технології", ІТТ. 2023. (Харків, 27–28 листопада 2023 р), Харків, 2023. С. 63–64.

37. Dahal K., Prokhorchenko A., Koirala R., Ahmed Sh., Parkhomenko L., Kravchenko M., Kharchenko D. Improvement of railway transportation of grain cargoes in Ukraine based on the principles of shared logistics. Proceedings of the 4th international scientific and technical conference "Intelligent transport technologies", ІТТ. 2023. (Kharkiv, November 27–28 2023), Kharkiv, 2023. P. 77–79

38. Бутько Т.В., Пархоменко Л.О. Формування методів і моделей управління експлуатаційною роботою залізничної транспортної системи в умовах ризиків. Матеріали двадцятої науково-практичної міжнародної конференції "Міжнародна транспортна інфраструктура, індустриальні центри та корпоративна логістика", NTI. 2024. (Харків, 6–7 червня 2024 р.) , Харків, 2024. С. 45–47.

39. Пархоменко Л.О., Прохоров В.М., Калашнікова Т.Ю. Нечітка логіка другого типу як інструмент управління експлуатаційною роботою в умовах невизначеностей і ризиків. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 3 (додаток). С. 39–40.

40. Спосіб перевезення вантажів залізничним вагоном та його розвантаження на роторному вагоноперекидачі: пат. № 119656 Україна, МПК (2017.01). B61F 1/06 (2006.01), B60S 11/00, B65G 67/34 (2006.01), B65G 63/00, B61D 47/00. a2013 04011; заявл. 01.04.2013; опубл. 10.10.2017, Бюл. № 19. 6 с.

41. Система регулювання руху транспортних засобів: пат. № 139834 Україна, МПК G00G 1/08 (2006.01). u2019 06658; заявл. 13.06.2019; опубл. 27.01.2020, Бюл. № 2. 2 с.

## АНОТАЦІЯ

Пархоменко Л. О. Розвиток теорії управління експлуатаційною роботою залізничної системи в умовах невизначеностей і ризиків. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.01 – транспортні системи (275 – транспортні технології). –

Український державний університет залізничного транспорту, МОН України, Харків, 2025.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної наукової проблеми для залізничного транспорту – розвитку теорії управління експлуатаційною роботою залізничної системи в умовах невизначеностей і ризиків. У дисертаційній роботі запропоновано підходи, методи, моделі і технології, які призначені для забезпечення ефективного управління експлуатаційною роботою підсистем залізничного транспорту в умовах дії факторів невизначеності і ризиків.

Запропоновано підхід щодо уточнення моделей як спосіб зменшення невизначеності на стратегічному рівні управління залізничної системи на прикладі уточнення моделі розрахунку плану формування одногрупних вантажних поїздів. Запропоновані підходи, оптимізаційні і прогностичні моделі, спрямовані на підвищення рівня точності і надійності тактичного планування в умовах невизначеності, пов'язаної з коливаннями вагонопотоків та пасажиропотоків. Запропонована технологія оперативного управління роботою технічних станцій, що реалізує підходи ризик-менеджменту і спрямована на вирішення проблеми недотримання строків доставки вантажів залізничним транспортом. Запропонована модель управління формуванням контейнерних поїздів на термінальних залізничних станціях і просуванням їх залізничною мережею до порту в контексті інтермодальних міжнародних перевезень, яка забезпечує надійну взаємодію між різними видами транспорту в умовах невизначеності, обумовленої волатильністю контейнеропотоків. Запропоновано технологію швидкої доставки контейнерів, яка базується на використанні інноваційних технічних рішень у вигляді модульних поїздів CargoSprinter та автоматичних вантажних систем MetroCargo, ключовим елементом якої є робастна модель управління, спрямована на нівелювання негативного впливу невизначеності, пов'язаної зі стохастичністю і відсутністю повної інформації про часові рамки виконання технологічних операцій.

*Ключові слова:* фактори невизначеності, фактори ризику, залізничний транспорт, управління експлуатаційною роботою, транспортна система.

## ABSTRACT

Parkhomenko L.O. Development of the theory of operational work management of the railway system under conditions of uncertainty and risks. - Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for a for the degree of Doctor of Engineering Sciences in specialty 05.22.01 – Transport Systems (275 – Transport Technologies). – Ukrainian State University of Railway, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv 2025.

The dissertation addresses an important scientific problem for railway transport: the development of the theory of operational work management for the railway system under conditions of uncertainty and risk. The dissertation proposes approaches, methods, models, and technologies designed to ensure effective management of the operational work of railway transport subsystems in the presence of uncertainty and risk factors.

An approach is proposed to refine models as a way to reduce uncertainty at the strategic level of railway system management, exemplified by the refinement of the model for calculating the single-group freight train formation plan. This involved introducing a function into the model to calculate the time cost coefficient for wagon dwell time at marshalling yards depending on the yard's workload. Additionally, a method for determining the parameters of this function based on statistical data was proposed. The refined model enabled a 3.5% reduction in actual costs associated with train accumulation and reformation across the network.

The proposed approaches, optimization, and forecasting models are aimed at improving the accuracy and reliability of tactical planning under uncertainty associated with fluctuations in wagon flows and passenger flows. A model was developed for planning routes of high-speed passenger trains in a direction with a significant share of tourist passenger flow under conditions of uncertainty. A technology for operational management of technical station operations is proposed, implementing risk management approaches to address the problem of non-compliance with freight delivery deadlines. A vector optimization model was developed for operational planning of technical station operations, addressing both operational cost criteria and the risk of potential freight delivery delays. The application of the proposed optimization model and risk management approach allowed for a 62% reduction in the total risk associated with untimely delivery and an almost 8% decrease in the station's overall operating costs.

A model for managing the formation of container trains at terminal railway stations and their movement through the railway network to ports in the context of intermodal international transportation was proposed, ensuring reliable interaction between different modes of transport under conditions of uncertainty caused by container flow volatility. A rapid container delivery technology was also proposed, based on innovative technical solutions such as modular CargoSprinter trains and automated MetroCargo freight systems. The key element of this technology is a robust management model aimed at mitigating the negative impact of uncertainty associated with stochasticity and incomplete information about the timing of technological operations. Moreover, the same procedure was used to calculate a current plan with fixed operating “windows” at workstations. The costs of the robust plan exceeded those of the optimal plan with fixed initial data by only 6.5%, which is a reasonable trade-off for robustness. This robustness, in turn, is compensated by the ability to quickly respond to unforeseen changes, avoiding significant delays and losses.

All theoretical and practical results of the dissertation can be used to develop and improve technologies for strategic, tactical, and operational planning of enterprises directly responsible for organizing transportation processes on the railway. Their application can significantly enhance the efficiency of operational management in railway transport.

*Keywords:* uncertainty factors, risk factors, railway transport, operational work management, transport system.

ПАРХОМЕНКО ЛАРИСА ОЛЕКСІЇВНА

УДК 656.2.022:519.8

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ УПРАВЛІННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЮ РОБОТОЮ  
ЗАЛІЗНИЧНОЇ СИСТЕМИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ І РИЗИКІВ**

05.22.01 – транспортні системи

**РЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск



доц. Прохоров В. М.

---

Підписано до друку 24.02.2025 р.  
Формат паперу 60×84 1/16. Папір для множних апаратів.  
Умовн. друк. арк. 1,9. Обл.-вид. арк. 2,0  
Замовлення №170. Тираж 70 прим.

---

Видавець та виготовлювач Український державний університет  
залізничного транспорту,  
61050, м. Харків, майдан Фейербаха, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.