

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра управління експлуатаційною роботою

Підвищення конкурентоспроможності залізничних контейнерних перевезень за
рахунок сучасних підходів

Пояснювальна записка та розрахунки
до кваліфікаційної роботи

ПКЗКП.300.00.00.000 ПЗ

Розробив студент групи 221-ОПУТ-Д24
спеціальності 275/275.02 – Транспортні
технології (на залізничному транспорті)
(роботу виконано самостійно, відповідно
до принципів академічної доброчесності)


Віталій РЕБРУН
(підпис)

Керівник: доцент, канд. техн. наук

Віктор ПРОХОРОВ

Рецензент: професор, д-р техн. наук

Олександр Лаврухін

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет управління процесами перевезень

Кафедра управління експлуатаційною роботою

Освітній рівень: магістр

Спеціальність 275 Транспортні технології

275.02 Транспортні технології (на залізничному транспорті)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,
професор, д-р техн. наук



Тетяна БУТЬКО

« 24 » лютого 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Ребруну Віталію Олександровичу

1 Тема проекту (роботи) Підвищення конкурентоспроможності залізничних контейнерних перевезень за рахунок сучасних підходів.

керівник Прохоров Віктор Миколайович, канд. техн. наук, доцент

затверджена розпорядженням по факультету управління процесами перевезень
від 23 лютого 2026 року №06/26

2 Строк подання студентом роботи 15 червня 2026 року

3 Вихідні дані до роботи: абстрактний полігон, що представлений графом залізничної мережі; абстрактні дані для моделювання роботи залізничного оператора контейнерних на заданому полігоні залізничної мережі.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) вступ; аналіз сучасного стану та проблем конкурентоспроможності залізничних контейнерних перевезень в Україні; огляд наукових публікацій за даною темою; формування концепції підвищення конкурентоспроможності залізничних контейнерних перевезень; модель підвищення конкурентоспроможності залізничних контейнерних перевезень; оцінка економічної ефективності від впровадження запропонованої моделі та технології.

5 Перелік графічного матеріалу: тема магістерської кваліфікаційної роботи; мета і задачі дослідження, об'єкт дослідження, предмет дослідження; наукова новизна отриманих результатів; динаміка показників контейнерних перевезень в Україні; модель запропонованої системи або технології, результати розрахунків із використанням запропонованої моделі; економічні розрахунки.

6 Консультанти окремих розділів

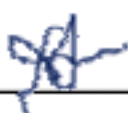
Розділ	Прізвище, ініціали, посада та науковий ступінь консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічне обґрунтування запропонованого проектного рішення	Гриценко Н.В., доцент, к.е.н.		

7. Дата видачі завдання 24 лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Аналіз динаміки показників залізничних перевезень в Україні.	15.03.2026	
2. Аналіз наукових публікацій за темою сучасних тенденцій розвитку систем швидких залізничних контейнерних перевезень	15.04.2025	
3. Формування математичної моделі побудови системи швидких залізничних контейнерних перевезень	30.04.2025	
4. Розрахунки із застосуванням запропонованих моделей та аналіз результатів	15.05.2025	
5. Оцінка економічної ефективності від впровадження запропонованих рішень	30.05.2025	
Оформлення роботи	15.06.2026	

Здобувач  Віталій РЕБРУН

Керівник  Віктор ПРОХОРОВ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота містить презентацію з 11 слайдів та пояснювальну записку обсягом 76 аркушів формату А4, що включає 10 рисунків, 2 таблиці та 22 літературних джерела.

Ключові слова: КОНТЕЙНЕРНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ, ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖІ, МЕРЕЖІ ПЕТРІ, ГРАФІК РУХУ ПОЇЗДІВ.

Об'єктом дослідження є процес організації контейнерних перевезень у магістральному залізничному сполученні.

Метою дослідження є підвищення ефективності та конкурентоспроможності залізничних контейнерних перевезень шляхом розробки підходів до формування мережі швидкої доставки вантажів на основі принципів експрес-логістики та оптимізації її експлуатаційних параметрів.

У рамках роботи досліджено сучасні підходи до організації контейнерних перевезень на коротких та середніх відстанях та розглянуто можливості підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту відносно автомобільних перевезень та запропоновано концепцію мережі маятникових контейнерних перевезень.

Розроблено математичну модель багатокритеріальної оптимізації топології транспортної мережі, яка враховує показники часу доставки, балансування навантаження, кількість вузлових станцій та структурні характеристики графа. На основі оптимізованого графа побудовано часову мережу Петрі та на її основі у результаті моделювання отримано узгоджений циклічний графік руху поїздів у мережі.

Отримані результати можуть бути використані як основа для створення цифрових моделей транспортних систем та підтримки прийняття рішень при плануванні контейнерних перевезень. Практична значущість роботи полягає у можливості підвищення ефективності використання транспортної інфраструктури та скорочення часу доставки контейнерів.

ABSTRACT

The qualification work includes an 11-slide presentation and an explanatory report consisting of 76 A4 pages, including 10 figures, 2 tables, and 22 references.

Keywords: CONTAINER TRANSPORTATION, NETWORK OPTIMIZATION, PETRI NETS, TRAIN TIMETABLING

The object of the study is the process of organizing container transportation within the mainline railway network.

The purpose of the study is to improve the efficiency and competitiveness of railway container transportation by developing approaches to the formation of a rapid freight delivery network based on the principles of express logistics and optimization of its operational parameters.

The work investigates modern approaches to organizing container transportation over short and medium distances and considers possibilities for increasing the competitiveness of railway transport relative to road transportation. A concept of a shuttle container transportation network is proposed.

A mathematical model for multi-criteria optimization of transport network topology has been developed, taking into account delivery time, load balancing, the number of hub stations, and structural graph characteristics. Based on the optimized graph, a timed Petri net was constructed, and simulation results were used to obtain a coordinated cyclic train timetable for the network.

The obtained results can be used as a basis for the development of digital models of transport systems and decision-support tools for container transportation planning. The practical significance of the work lies in the potential to improve the efficiency of transport infrastructure utilization and reduce container delivery times.

Зміст

ВСТУП	8
1 Аналіз сучасного стану та проблем конкурентоспроможності залізничних контейнерних перевезень в Україні	10
1.1 Аналіз техніко-технологічних параметрів контейнерних перевезень	10
1.2 Аналіз транскордонних контейнерних перевезень та ролі інтермодальних терміналів у євроінтеграційних процесах	14
1.3 Синергія концепцій green deal та just-in-time як каталізатор технологічного переоснащення залізничних мереж	17
1.4 Обґрунтування переваг залізничного транспорту в період повоєнного відновлення та модернізації промисловості	19
2. Огляд наукових публікацій	24
2.1 Інтермодальні та мультимодальні транспортні системи	24
2.2 Проєктування мережі вантажних перевезень	25
2.3 Концепція сухого порту та інтермодальних внутрішніх терміналів	25
2.4 Міська вантажна логістика та Rail-Based City Logistics	26
2.5 Екологічна конкурентоспроможність залізничного транспорту	27
2.6 Синхромодальність і гнучкість транспортних систем	28
2.7 Поведінка вантажовідправників і вибір виду транспорту	28
3 Формування концепції магістральної залізничної мережі експрес-доставки на принципах крос-докінгу та хабових технологій	30
3.1 Формування залізничної мережі експрес-логістики Rail Express Network	30
3.2 Аналіз світового досвіду та технологічних прецедентів впровадження експрес-систем залізничних перевезень	32
4 Математична формалізація та постановка задачі оптимізації топології контейнерної мережі	36

					ПКЗКП 300.00.00 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Ребрун				Підвищення конкурентоспроможності залізничних контейнерних перевезень за рахунок сучасних підходів		
Перевір.	Прохоров						
Н. контр.	Прохоров				УкрДУЗТ		
Затв.	Бутько						
					Лім.	Арк.	Аркуші
						6	76

4.1 Математична формалізація структури транспортного графа та багатокритеріальна постановка задачі оптимізації мережі	36
4.2 Обґрунтування критеріїв багатокритеріальної оптимізації транспортної мережі	38
4.2.1. Критерій мінімізації кількості поїздів у системі	38
4.2.2. Критерій мінімізації середнього часу доставки вантажів	39
4.2.3. Критерій рівномірності власної центральності станцій	39
4.2.4. Критерій оптимізації кількості вузлів з підвищеною зв'язністю	40
4.2.6. Клієнтські критерії та структурна стійкість	41
4.3 Модель векторної оптимізації	41
5 Формування процедури оптимізації і проведення моделювання	43
5.2. Механізм «схлопування» транзитних станцій та спрощення топології	46
5.3. Обмеження алгебраїчної зв'язності та спектральний аналіз	47
6 Архітектура цифрового двійника транспортної системи	50
6.1. Трирівнева архітектура цифрового двійника залізничної мережі експрес-доставки та її функціональна декомпозиція	50
6.2 Формальне визначення та алгебраїчна семантика мережі Петрі для задачі побудови графіка руху	51
6.3 Побудова часової мережі	54
6.4 Розрахунок сталого режиму роботи мережі і побудова ГРП	61
7 Економічне обґрунтування створення мережі швидкісної контейнерної доставки	67
7.1 Розрахунок дохідної частини проекту	67
7.2 Оцінка витрат та інвестицій	68
7.3 Визначення інтегрального економічного ефекту	69
Висновки	72
Список використаних джерел	74

ВСТУП

Сучасний ринок глобальної логістики трансформується у висококонкурентне середовище, де визначальним фактором успіху є не лише вартість, а насамперед швидкість та гарантована терміновість доставки вантажів. У цих умовах залізничний транспорт України стикається з критичним викликом: традиційні методи організації вантажних перевезень демонструють низьку адаптивність до запитів сегменту дрібнопартійної експрес-доставки, що призводить до стійкого відтоку високомаржинальних вантажів на автомобільний транспорт. Особливої гостроти проблема набуває у сфері контейнерних перевезень, де залізниця часто програє через тривалі терміни накопичення составів та затримки на технічних станціях. Відповідно до Національної транспортної стратегії до 2030 року, пріоритетним напрямком модернізації є цифрова трансформація та впровадження інтелектуальних систем керування рухом.

Науковий пошук у напрямку створення регулярної мережі швидкої доставки контейнерів на принципах Precision Scheduled Railroading (PSR) та технології **крес-докінгу** є нагальною інженерною задачею. Актуальність теми підсилюється необхідністю інтеграції української залізниці в європейську логістичну систему, що потребує переходу від інерційних моделей управління до динамічних мережевих структур. Стан інфраструктури та дефіцит тягового ресурсу АТ «Укрзалізниця» вимагають розробки рішень, які б дозволили максимізувати пропускну спроможність без надмірних капітальних витрат – за рахунок оптимізації топології мережі та впровадження цифрових двійників. Створення «залізничного оператора експрес-доставки», що функціонує за принципами, аналогічними лідерам поштового ринку, дозволить радикально скоротити час обороту контейнера та підвищити енергоефективність логістичних ланцюгів у межах стратегії Green Deal.

Метою роботи є підвищення ефективності та конкурентоспроможності залізничних контейнерних перевезень шляхом розробки підходів до формування мережі швидкої доставки вантажів на основі принципів експрес-логістики та оптимізації її експлуатаційних параметрів.

Об'єкт дослідження: процес організації контейнерних перевезень у магістральному залізничному сполученні.

Предмет дослідження: технологія організації залізничних контейнерних перевезень на основі концепції експрес-логістики.

Для досягнення визначеної мети необхідно виконати наступні завдання:

- проаналізувати сучасний стан та світові тенденції розвитку швидких вантажних залізничних контейнерних перевезень;
- сформулювати вимоги, концепцію та математичну модель побудови мережі швидких залізничних контейнерних перевезень;
- розробити процедуру для реалізації запропонованої математичної моделі;
- розробити необхідні заходи для забезпечення функціонування запропонованої системи контейнерних перевезень;
- виконати оцінку потенційної ефективності запропонованих рішень..

Наукова новизна отриманих результатів:

- **удосконалено:** математичний апарат оптимізації транспортних мереж шляхом введення іноваційного критерію рівномірності власної центральності станцій для забезпечення надійності системи.

Публікації. Відповідно до теми роботи опубліковано 1 наукову статтю в фаховому журналі [1].

1 Аналіз сучасного стану та проблем конкурентоспроможності залізничних контейнерних перевезень в Україні

1.1 Аналіз техніко-технологічних параметрів контейнерних перевезень

Сучасний етап розвитку транспортної системи України характеризується глибокою диспропорцією між потенційними можливостями залізничної інфраструктури та реальним станом ринку контейнерних перевезень. Незважаючи на розгалужену мережу колій та стратегічне розташування країни як транзитного хаба між Європейським Союзом та країнами Азії, залізничний сегмент продовжує втрачати позиції у конкурентній боротьбі з автомобільним транспортом. Аналіз структури вантажопотоків демонструє, що основна частка залізничних перевезень зосереджена в секторі низькомаржинальних сировинних вантажів, таких як зернові культури, які складають майже половину всього обсягу експорту, чорні метали та продукти переробки олійних культур. У той же час високотехнологічні вантажі та товари з високою доданою вартістю, що найкраще підходять для контейнеризації, масово переходять на автомобільні шляхи.

Детальний аналіз структури вантажної бази є першочерговим етапом при проектуванні будь-якої транспортної мережі, оскільки саме фізико-хімічні властивості вантажу та обсяги його споживання визначають вимоги до спеціалізації рухомого складу, типів застосовуваних контейнерів та параметрів термінальної обробки. Згідно з даними, представленими на рисунку, що ілюструє номенклатуру вантажів, перевезених у контейнерах в Україні, спостерігається чітко виражена спеціалізація ринку на аграрній продукції та сировинних ресурсах, рис. 1.

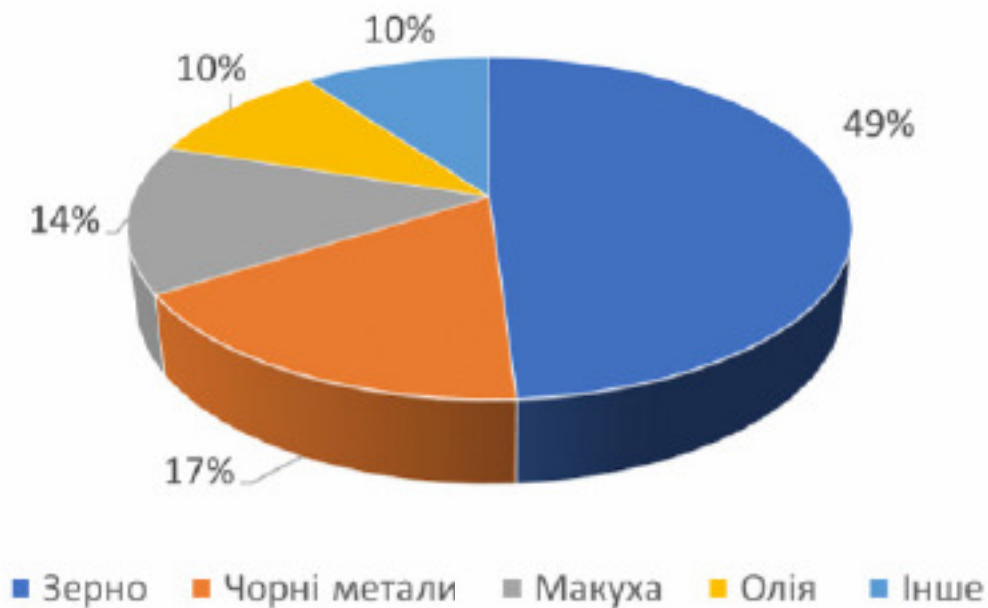


Рисунок 1.1 — Номенклатура вантажів, перевезених у контейнерах в Україні

Найбільшу частку в загальній структурі займають зернові вантажі, що становлять 49% від сукупного обсягу. Таке домінування зерна в контейнерних потоках є відносно новим явищем для української залізниці, оскільки традиційно цей вантаж транспортувався виключно спеціалізованими вагонами-хоперами. Перехід до контейнеризації зернових у 2023 році став вимушеним, але стратегічно важливим кроком, зумовленим необхідністю забезпечити гнучкість експортних ланцюгів в умовах обмеженого доступу до глибоководних портів (рис. 1.2.). З інженерної точки зору це означає масове використання стандартних 20-футових контейнерів з внутрішніми вкладишами (liner bags), що вимагає специфічного обладнання для навантаження на елеваторах та відповідних потужностей для перевалки на залізничних станціях.

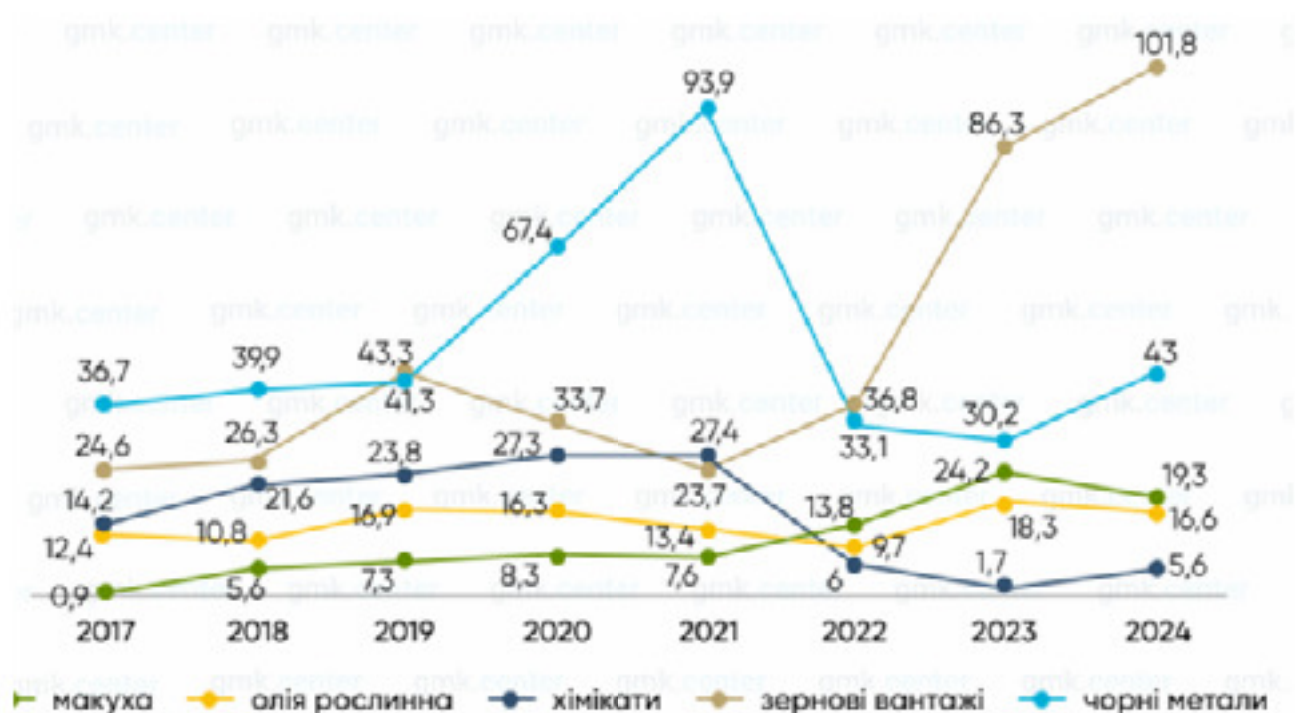


Рисунок 1.2 — Динаміка обсягів вантажів, перевезених у контейнерах в Україні

Другим за вагомістю сегментом є чорні метали, частка яких складає 17%. Перевезення металопродукції в контейнерах – від сталевих рулонів до сортового прокату – вимагає високої концентрації навантаження на підлогу контейнера та платформу, що накладає жорсткі вимоги до технічного стану парку залізничних платформ. Саме в цьому сегменті залізниця відчуває найбільш гостру конкуренцію з боку автомобільного транспорту. Автомобільні перевізники використовують спеціалізовані напівпричепи, здатні заїжджати безпосередньо в цехи металургійних комбінатів, тоді як залізниця змушена використовувати складні маневрові схеми, що суттєво збільшує час доставки та ризики пошкодження вантажу при перевантаженнях. У структурі експорту також вагоме місце посідають продукти переробки агросектору, зокрема макуха (14%) та рослинна олія (10%). Якщо макуха транспортується аналогічно до зернових у насипному вигляді всередині контейнерів, то олія вимагає застосування технології флексітанків. Використання флексітанків дозволяє перетворити стандартний сухий контейнер на тимчасовий резервуар для рідин, що радикально підвищує ефективність використання рухомого

складу, оскільки зникає потреба в порожньому пробігу цистерн у зворотному напрямку. Проте ця технологія потребує високої якості залізничної колії, оскільки значні динамічні коливання під час руху поїзда можуть призвести до гідроударів та розгерметизації еластичних ємностей.

Окрему увагу слід приділити категорії «Інше», яка займає 10% вантажопотоку. Сюди входять товари народного споживання, хімічна продукція та обладнання – саме ті вантажі, які мають найбільшу додану вартість. Проте саме за ці 10% залізниця практично припинила боротьбу з автотранспортом. Причина полягає в тому, що для замовника таких товарів ключовим фактором є не ціна, а швидкість та надійність доставки (lead time). На коротких та середніх відстанях у 200–800 км залізнична система в Україні наразі не здатна забезпечити конкурентоспроможні показники швидкості через застарілі методи формування поїздів на сортувальних станціях. Поки автомобіль здійснює доставку протягом 12–18 годин, залізничний контейнер може проводити в очікуванні накопичення поїзда або маневрових операцій до кількох діб. Це створює ситуацію, за якої залізниця перетворюється на «сировинний конвеєр», тоді як найбільш прибуткові та стабільні сегменти ринку повністю переходять на автомобільні дороги, що призводить до їх надмірного зносу та погіршення екологічної ситуації.

Наявна номенклатура вантажів чітко вказує на те, що для підвищення ефективності перевезень необхідно відійти від практики «універсального перевізника» та впроваджувати спеціалізовані експрес-сервіси. Для зернових та металів це мають бути поїзди великої маси, що рухаються за жорстким графіком між великими хабами, тоді як для сегменту «Інше» та олії критично важливим є впровадження принципів Precision Scheduled Railroading (PSR). Це дозволило б синхронізувати роботу хабів та забезпечити регулярність руху, аналогічну до роботи магістральних автоперевізників. Без впровадження таких інноваційних підходів, навіть маючи значну базу в 49% зернових, залізниця залишатиметься вразливою до ринкових коливань та подальшої експансії автомобільного транспорту в сегменти з вищою рентабельністю. Аналіз структури вантажів 2023 року стає базисом для математичного моделювання майбутньої мережі, де кожен тип вантажу має бути

врахований при розрахунку пропускної спроможності хабів та частоти курсування контейнерних поїздів.

1.2 Аналіз транскордонних контейнерних перевезень та ролі інтермодальних терміналів у євроінтеграційних процесах

Сучасний стан залізничної логістики України нерозривно пов'язаний із розвитком транспранскордонних переходів, які виступають критичними вузлами в системі міжнародних транспортних коридорів. Особливого значення в цій архітектурі набуває термінал Мостиська, який виконує функцію «сухопутного порту» та ключового шлюзу для виходу українських товарів на європейські ринки. Аналіз географії зв'язків даного вузла, представлений на відповідній картосхемі, демонструє розгалужену мережу сполучень, що охоплює найважливіші контейнерні термінали та морські порти Західної та Центральної Європи. Ключовим стратегічним вектором є західний напрямок, де термінал забезпечує прямий доступ до таких потужних логістичних центрів Німеччини, як Дуйсбург, Франкфурт-на-Одері та Гамбург. Ці вузли є фундаментальними точками розподілу вантажопотоків у межах Європейського Союзу, що дозволяє українським експортерам інтегруватися в ланцюги поставок найбільших світових виробників.

Транскордонна логістика через термінал Мостиська характеризується мультивекторністю, що підтверджується наявністю сталих маршрутів до портів Північного моря, зокрема Антверпена (Бельгія) та Роттердама (Нідерланди), які є найбільшими контейнерними хабами світу (рис. 1.3.).



Рисунок 1.3 – Зв’язки терміналу Мостиська з контейнерними терміналами та портами Європи

Окрім того, важливу роль відіграє північний вектор, що з’єднує Україну з польськими портами Гданськ та Гдиня, а також з Клайпедою (Литва), що створює альтернативний логістичний шлях через Балтійське море. Окремим перспективним напрямком є вихід до порту Трієст (Італія), що відкриває доступ до Адріатичного басейну та Середземномор’я, суттєво розширюючи географію українського експорту. Наявність таких потенційних напрямків, як Прага та Люксембург, свідчить про активну фазу проектування нової логістичної топології, яка має на меті створити безшовну систему доставки контейнерів між Україною та ЄС.

Проте, незважаючи на широку географію зв’язків, ефективність транспранскордонних перевезень стикається з низкою технічних та технологічних бар’єрів. Основним викликом залишається різниця в ширині залізничної колії (1520 мм проти 1435 мм), що вимагає складних операцій з перевантаження контейнерів або заміни візків рухомого складу. Саме на терміналі Мостиська відбувається основна концентрація цих операцій, що робить його «вузьким місцем» у разі

нерациональної організації роботи. Аналіз існуючих (Existing destinations) та перспективних (Potential destinations) маршрутів вказує на те, що залізниця наразі програє конкуренцію автотранспорту в частині гнучкості та швидкості проходження кордону. Автомобільні перевізники часто швидше проходять митні процедури та уникають тривалих очікувань на формування повновагових поїздів, що є критичним для товарів з високою доданою вартістю.

Вирішення проблеми низької швидкості транспранскордонної доставки контейнерів лежить у площині переходу від традиційних методів управління до концепції Precision Scheduled Railroading (PSR) та регулярної експрес-логістики. Це передбачає створення фіксованого розкладу руху контейнерних поїздів між Мостиською та європейськими хабами, незалежно від ступеня їх завантаження на початковому етапі, що забезпечить клієнтам таку ж передбачуваність, яку пропонує автотранспорт. Реалізація такого підходу вимагає впровадження технологій швидкого перевантаження та цифрової синхронізації з європейськими залізницями, де термінал Мостиська виступає центральним елементом мережі. На малюнку чітко видно, що успішна інтеграція в європейську систему вимагає не просто наявності рейок, а побудови інтелектуальної топології, яка б мінімізувала час перебування контейнера у вузлових точках.

В контексті наукового дослідження, аналіз зв'язків терміналу Мостиська з європейськими портами стає емпіричною базою для формування математичної моделі оптимізації транспортної мережі. Використання теорії графів дозволяє представити ці зв'язки як ребра зваженого графа, де вагами виступають час та вартість доставки. Задача полягає в тому, щоб на основі існуючої інфраструктури, показаної на схемі, спроектувати таку конфігурацію внутрішніх українських хабів, яка б забезпечувала найкоротший шлях доставки від виробника в глибині країни до транскордонного терміналу. Це підводить до необхідності розробки алгоритмів, що враховують не лише відстань, а й пропускну спроможність переходів та рівномірність навантаження на мережу, що є центральною темою даної роботи. Таким чином, термінал Мостиська розглядається не як окремий об'єкт, а як

критичний інтерфейс між внутрішньою оптимізованою мережею експрес-доставки та глобальними логістичними ринками.

1.3 Синергія концепцій green deal та just-in-time як каталізатор технологічного переоснащення залізничних мереж

Сучасна парадигма розвитку глобальних логістичних систем диктує жорсткі вимоги до екологічності та часової точності доставок, що знаходить своє відображення у стратегічних ініціативах European Green Deal. Для України, як майбутнього повноправного члена європейського економічного простору, дотримання екологічних стандартів стає не просто питанням репутації, а критичною умовою доступу на зовнішні ринки. Концепція Green Deal передбачає радикальне скорочення викидів парникових газів від транспортного сектору, що практично неможливо реалізувати при подальшому домінуванні автомобільного транспорту на магістральних напрямках. Питома енергоємність залізничних перевезень є значно нижчою, а використання електротяги дозволяє мінімізувати карбоновий слід вантажу. Проте, просте декларування екологічних переваг залізниці не є достатнім для реального перетоку вантажопотоків. Необхідне створення такої техніко-технологічної бази, де екологічність поєднуватиметься з економічною доцільністю, що стає можливим лише за умови впровадження принципів Just-in-Time (точно в строк).

Впровадження моделі Just-in-Time у залізничному сегменті вимагає перегляду всієї класичної теорії організації руху. Традиційна система, орієнтована на накопичення вагонів для формування довгосоставних поїздів, за своєю суттю суперечить логіці JIT, оскільки створює непередбачувані затримки на сортувальних станціях. Для промислових підприємств повоєнного відновлення, які працюють за принципами ощадливого виробництва (Lean Production), затримка комплектуючих навіть на кілька годин може призвести до зупинки конвеєра та колосальних збитків.

Таким чином, залізниця має трансформуватися з інертної системи на гнучкий сервіс експрес-доставки. Це означає перехід до регулярного курсування контейнерних поїздів фіксованої складності за чіткими нитками графіка, що дозволяє вантажовласникам планувати свої виробничі цикли з точністю до хвилини. Такий підхід нівелює головну перевагу автотранспорту – мобільність – і додає залізниці унікальну перевагу масштабованості при дотриманні екологічних норм.

Інженерна реалізація симбіозу Green Deal та Just-in-Time безпосередньо пов'язана з автоматизацією термінальної інфраструктури, прикладом якої є згадана раніше система MetroCargo. Використання подібних технологій дозволяє інтегрувати залізницю безпосередньо у виробничі ланцюги, минаючи складні та енергоємні етапи проміжного зберігання вантажів. Автоматизоване перевантаження контейнерів забезпечує високу швидкість обробки поїзда, що є критичним для коротких плечей доставки, де час навантаження-розвантаження становить значну частку в загальному часовому бюджеті перевезення. Більше того, цифровізація цього процесу дозволяє відстежувати енергоефективність кожного контейнеро-кілометра в режимі реального часу, формуючи «зелений сертифікат» вантажу, що стає вагомим аргументом при розрахунку податків на викиди вуглецю (CBAM) при перетині кордону з ЄС.

З математичної точки зору, забезпечення вимог JIT та Green Deal у масштабній мережі залізниць України є надскладною задачею оптимізації. Необхідно не просто побудувати маршрут, а створити топологічно збалансовану мережу хабів, де кожна вузлова станція має бути оптимізована за критерієм мінімізації часу простою. Саме тут виникає потреба у застосуванні спектральної теорії графів та генетичних алгоритмів для проектування структурного ядра транспортної системи. Оптимізація топології дозволяє знайти такий баланс між кількістю поїздів та завантаженням ділянок, при якому досягається максимальна енергоефективність (згідно Green Deal) за умови гарантованого часу доставки (згідно Just-in-Time). Це створює наукове підґрунтя для розробки цифрового двійника залізниці, який зможе моделювати різні сценарії попиту та адаптувати графік руху в динаміці.

Завершуючи аналіз, слід підкреслити, що залізниця України стоїть перед історичним вибором: залишитися в ролі перевізника сировини з високим рівнем зносу та низькою доданою вартістю, або стати лідером європейської «зеленої» логістики. Інтеграція принципів Just-in-Time та дотримання стандартів Green Deal вимагають не лише оновлення рухомого складу, а насамперед впровадження інтелектуальних систем управління та науково обґрунтованого проектування транспортної мережі. Дане дослідження, спрямоване на розробку методів багатокритеріальної оптимізації топології контейнерної мережі, є прямим внеском у реалізацію цієї стратегії, дозволяючи перетворити залізницю на високоефективний, екологічний та надійний інструмент повоєнного економічного зростання.

1.4 Обґрунтування переваг залізничного транспорту в період повоєнного відновлення та модернізації промисловості

Прогнозування розвитку транспортної системи України в повоєнний період вказує на неминуче зростання промислового виробництва, що супроводжуватиметься радикальною зміною структури вантажопотоків. Очікуване відновлення індустриальних потужностей та приплив іноземних інвестицій призведуть до формування високого попиту на доставку не лише сировини, а й високотехнологічних товарів, цінних комплектуючих, електронного обладнання та продукції машинобудування. Для таких категорій вантажів ключовими параметрами є швидкість, цілісність та регулярність поставок. У цьому контексті конкуренція між залізничним та автомобільним транспортом набуває нового технологічного змісту. На сьогодні автомобільні шляхи України перебувають у критичному стані через надмірні навантаження та руйнування інфраструктури, що робить магістральні автоперевезення менш надійними та дорожчими через постійне зростання витрат на амортизацію транспортних засобів та паливо. Залізниця, володіючи відокремленою

мережею, має потенціал стати фундаментом для стабільної експрес-логістики, що не залежить від заторів на дорогах чи стану дорожнього покриття.

Важливим аспектом конкурентоспроможності залізничного транспорту є його екологічна ефективність, що повністю відповідає європейському курсу «Green Deal». Питомі викиди вуглекислого газу та інших шкідливих речовин при залізничних перевезеннях у розрахунку на одну тонно-кілометру в кілька разів нижчі, ніж у автомобільного транспорту. В умовах інтеграції України до європейських промислових ланцюгів, екологічний слід продукції ставатиме визначальним фактором для міжнародних партнерів. Окрім екологічності, залізниця демонструє вищий рівень безпеки та збереження вантажів, особливо при перевезенні дорогих компонентів, оскільки контейнерний поїзд є закритою системою з централізованим контролем, що значно знижує ризики розкрадання чи пошкодження в порівнянні з розрізненими автоколонами.

Проте, щоб конвертувати ці природні переваги у реальну частку ринку, залізнична система повинна впроваджувати технології, які нівелюють її головний недолік – складність та тривалість вантажних операцій. Як показано на схемі інноваційної системи MetroCargo, вирішення проблеми полягає в автоматизації процесу перевантаження контейнерів. Представлена технологія дозволяє здійснювати горизонтальне переміщення контейнерів безпосередньо між залізничною платформою та автомобільним напівпричепом або складською рампою без використання громіздких кранів чи річстакерів. Така система автоматизованого хаба забезпечує паралельну обробку кількох вагонів одночасно, що радикально скорочує час перебування поїзда на станції. Впровадження подібних рішень дозволяє інтегрувати залізницю в систему «точно в строк» (Just-in-Time), де контейнери з комплектуючими можуть зніматися з платформи та подаватися на виробничу лінію протягом лічених хвилин.

Використання автоматизованих систем перевантаження, інтегрованих у мережу опорних хабів, дозволяє залізниці успішно конкурувати з автотранспортом навіть на коротких відстанях, де раніше це вважалося неможливим. На схемі чітко відображено логіку взаємодії між магістральною залізницею та «останньою милею»,

яку виконує легкий автотранспорт. Такий симбіоз дозволяє використовувати залізницю для швидкого перекидання великих обсягів контейнерів між регіональними центрами, а автомобілі – лише для локального розвезення, що зменшує навантаження на розбиті магістральні автошляхи та знижує загальну енергоємність логістики. Це створює передумови для переходу до концепції Precision Scheduled Railroading, де рух контейнерних експресів стає таким же прогнозованим, як робота конвеєра на заводі.

Таким чином, повоєнне відновлення промисловості вимагає від залізниці не просто виконання функцій перевізника, а перетворення на інтелектуальне структурне ядро економіки. Поєднання екологічних переваг, високої надійності залізничного сполучення та інноваційних технологій автоматизованої перевалки типу MetroCargo дозволить Україні створити транспортну систему нового покоління. Це підводить до наукової задачі даної роботи – розробки математичної моделі та цифрового двійника такої мережі, де топологія хабів оптимізована під швидкісні зв'язки та мінімальний час обробки вантажів. Саме такий підхід забезпечить залізниці стратегічну перемогу в конкурентній боротьбі за високомаржинальні промтовари та стане запорукою стійкого індустріального розвитку держави в майбутньому.

Критичною проблемою є системна програшна позиція залізниці саме на коротких та середніх плечах доставки, що становлять від двохсот до восьмисот кілометрів. У цьому діапазоні автомобільний транспорт демонструє значно вищу оперативність та гнучкість, забезпечуючи доставку за принципом «від дверей до дверей» без необхідності складного маневрового формування поїздів. На відміну від залізниці, де процес від замовлення вагона до його подачі та подальшого слідування через сортувальні станції може тривати кілька діб, автотранспорт здатен розпочати перевезення протягом лічених годин. Це створює ситуацію, за якої вантажовласники свідомо обирають дорожчий автомобільний фрахт заради прогнозованості термінів та мінімізації ризиків простою виробництва, що фактично витісняє залізницю з ринку високооперативної логістики.

Геополітичні зміни та інтеграція України до європейського простору вимагають створення нових логістичних коридорів, що з'єднують внутрішні індустріальні центри, такі як Київ, Дніпро та Харків, з ключовими європейськими портами Гданська, Клайпеди, Констанци та великими вузлами на кшталт Антверпена чи Дуйсбурга. Проте існуюча модель організації залізничних перевезень, що базується на накопиченні повновагових поїздів, не дозволяє ефективно обслуговувати дрібні та середні партії контейнерів, які є основою європейського товарообігу. Потенційні напрямки до Праги, Відня чи Трієста залишаються лише проектними векторами доти, доки залізниця не зможе запропонувати швидкість та регулярність, порівнянну з автотранспортом. Відсутність чітких графіків руху та тривалий час обробки контейнерів на прикордонних переходах і внутрішніх терміналах лише посилює технологічне відставання від автомобільних перевізників.

Подальше нарощування конкурентоспроможності залізничного транспорту неможливе без радикальної зміни парадигми управління мережею та впровадження інноваційних інженерних рішень. Традиційні методи планування вичерпали свій ресурс, що обумовлює необхідність переходу до концепції Precision Scheduled Railroading, яка передбачає рух за суворим графіком та оптимізацію використання локомотивного і вагонного парків. Проте впровадження такої моделі в умовах української мережі потребує детального математичного обґрунтування топології транспортного графа, де кожна станція та хаб мають займати строго визначене місце для мінімізації загальних витрат часу та ресурсів. Це створює об'єктивну потребу в розробці інструментарію, який дозволить би моделювати транспортну систему не як набір окремих дільниць, а як цілісну інтелектуальну структуру.

Саме необхідність подолання технологічного розриву між залізницею та автотранспортом і забезпечення високої швидкості доставки контейнерів зумовлює актуальність даного дослідження. В основі роботи лежить ідея створення високоефективної системи залізничної експрес-доставки, яка базується на математичній оптимізації мережі з використанням теорії графів та генетичних алгоритмів. Такий підхід дозволяє сформулювати структурне ядро майбутнього

цифрового двійника транспортної системи, де параметри зв'язності, центральності станцій та рівномірності навантаження стають контрольованими величинами. Перехід до такої моделі організації перевезень дозволить не лише стабілізувати існуючі вантажопотоки зерна та металів, але й повернути на залізницю контейнерні вантажі, забезпечуючи їх швидке переміщення між ключовими логістичними вузлами України та Європи.

2. Огляд наукових публікацій

2.1 Інтермодальні та мультимодальні транспортні системи

Теоретичним підґрунтям проєктування розгалужених систем доставки є концепція інтермодального транспорту – організації перевезень, за якої вантажна одиниця (контейнер, піддон, напівпричіп) переміщується двома або більше видами транспорту без перевантаження самого вантажу. Фундаментальний огляд географії транспортних систем, включно з принципами формування інтермодальних мереж, подано в роботі Родріга, Комтуа та Слака [2]. Автори розглядають термінальні вузли як структуроутворювальні елементи мережі, а конкурентоспроможність залізничного вантажного транспорту пов'язують передусім із щільністю вузлової інфраструктури та частотою обслуговування.

Систематичний огляд задач дослідження операцій у галузі інтермодальних залізнично-автомобільних перевезень здійснено Махарісом та Бонтеконінгом [3]. Автори виділяють чотири класи задач: проєктування мережі, планування операцій у терміналах, маршрутизація рухомого складу та управління попитом. Цей поділ зберігає актуальність для проєктування систем із вузлами типу кросдокінгу. Близьку за структурою класифікацію, але з акцентом на залізнично-автомобільну взаємодію, запропоновано Бонтеконінгом, Махарісом та Тріпом [4], які також зафіксували формування окремої прикладної субдисципліни – дослідження інтермодальних вантажних перевезень.

Мультимодальне планування перевезень у широкому розумінні – з урахуванням часу, вартості та екологічних обмежень – систематизовано в огляді Стедісеїфі та співавторів [5]. Робота охоплює понад 100 публікацій і виявляє методологічний дефіцит у моделюванні систем із високою частотою відправлень і короткими маршрутами – саме того типу, що відповідає концепції CargoSprinter або метрокарго.

2.2 Проєктування мережі вантажних перевезень

Класичним теоретичним інструментом для обґрунтування конфігурації вузлово-лінійних мереж є модель проєктування сервісної мережі (service network design), розроблена Крейніком [6]. Модель формалізує вибір маршрутів, частоти рейсів і консолідації вантажопотоків в умовах обмежень за потужністю рухомого складу та строками доставки. Цей апарат безпосередньо застосовний до оптимізації розкладу CargoSprinter-рейсів між вузловими станціями.

Просторову конкурентоспроможність залізнично-автомобільних терміналів відносно зони тяжіння (hinterland) аналізує Нієра [7]. Автор показує, що реальна зона обслуговування терміналу залежить не лише від відстані, а й від співвідношення часу збирання-розвезення автомобільним транспортом і основного залізничного плеча. Цей висновок є критичним для обґрунтування доцільності метрокарго та CargoSprinter у щільній міській агломерації.

Порівняльну оцінку традиційних і інноваційних залізнично-автомобільних терміналів виконано Баллісом та Голіасом [8]. Автори аналізують продуктивність перевантажувального обладнання, витрати на маневрування та вплив розмірів партії вантажу на ефективність термінальних операцій – що безпосередньо стосується організації кросдокінгових вузлів у пропонованій системі.

Загальну типологію проєктних рішень транспортних мереж із позиції перевантажувальної логіки розробив Воксеніус [9]. Запропонована ним рамкова модель охоплює спектр від прямих перевезень до повністю консолідованих мереж з проміжними терміналами і дозволяє позиціонувати різні режими роботи CargoSprinter (shuttle vs. collect-and-distribute).

2.3 Концепція сухого порту та інтермодальних внутрішніх терміналів

Концепцію «сухого порту» (dry port) як внутрішнього контейнерного термінала, пов'язаного із морськими портами залізничним сполученням, обґрунтовано Росо, Воксеніусом та Лумсденом [10]. Хоча контекст публікації – морська логістика, принципи організації inland terminal, що виконує митне оформлення, консолідацію та депонування контейнерів, цілком відповідають ролі регіональних вузлів у проєктованій системі.

Математичну модель розміщення залізнично-автомобільних інтермодальних вузлів у мережі з урахуванням просторового попиту запропоновано Арнольдом, Пітерсом та Томасом [11]. Модель мінімізує сукупні транспортні витрати за умов заданого рівня сервісу і може бути адаптована для визначення оптимального розташування кросдокінгових станцій у залізничній мережі.

Концепцію «віртуального сухого порту» як форму організаційної інтеграції без будівництва нової фізичної інфраструктури розглянуто у Моніоса та Бергквіста [12]. Така модель особливо цікава для початкового етапу впровадження системи, коли повноцінні термінали ще не побудовані, але інформаційна та тарифна інтеграція між операторами вже функціонує.

2.4 Міська вантажна логістика та Rail-Based City Logistics

Міська вантажна логістика виокремила в самостійний науковий напрям у 1990-х роках. Ключовий стан проблеми – складність організації і реформування міських вантажних систем великих європейських міст – зафіксовано у Даблан [13]. Авторка показує, що головними бар'єрами є фрагментованість операторів, відсутність стимулів до консолідації та слабкість регуляторних інструментів – проблеми, що відтворюються і в сучасних умовах.

Моделі оцінювання і планування систем міської логістики на основі сценарного підходу розроблено Крейніком, Рікарді та Сторкі [14]. Автори формалізують концепцію «двошелонної» (two-echelon) системи: великі

консолідаційні центри (перший ешелон) і малі міські термінали (другий ешелон) із доставкою екологічно нейтральним транспортом – схема, що точно відповідає пропонованій архітектурі метрокарго + CargoSprinter.

Сучасний огляд практик і досліджень у сфері управління міськими вантажними системами надано Хольгуїн-Верасом та співавторами [15]. Автори аналізують ефекти переведення доставки на нічний час, впровадження консолідаційних центрів і альтернативних видів транспорту, підкреслюючи, що конкурентоспроможність рейкових рішень зростає зі збільшенням щільності забудови і обмеженням автодоступу до центру.

Тенденції розвитку концепції «розумних міських логістичних мереж» (smart city logistics networks) – еволюції від управління окремими вантажними потоками до інтегрованих мережових рішень із цифровим управлінням – систематизовано в роботі Бекташа, Крейніка та Ван Венсела [16].

2.5 Екологічна конкурентоспроможність залізничного транспорту

Емісійна складова є одним із ключових аргументів на користь залізничних рішень у порівнянні з автомобільними. Порівняльний аналіз викидів у ланцюгах залізнично-автомобільного та суто автомобільного транспорту за європейськими стандартами виконано Гайнольдом та Майзелем [17]. Автори показують, що переваги залізниці за викидами CO₂ реалізуються вже на плечах від 150–200 км, а за умов електрифікації тяги – і на коротших дистанціях.

Вплив часу доставки поза пік (off-hour deliveries) на екологічні та транспортні показники міста – конкретний варіант оптимізації, що застосовується у системах із нічними вікнами метрокарго, – досліджено Хольгуїн-Верасом та співавторами [18].

2.6 Синхромодальність і гнучкість транспортних систем

Концепція синхромодальності – динамічного перемикання між видами транспорту залежно від поточного попиту, ціни та завантаженості мережі – являє собою вищий рівень інтеграції порівняно з класичним інтермодальним транспортом. Критичні чинники успіху синхромодальних систем виявлено у Пфозера, Трейблмайера та Шауера [19]. Результати підкреслюють роль інформаційних платформ реального часу й узгодженого ціноутворення між операторами – що є інфраструктурною передумовою пропонованої системи.

Ринково орієнтований підхід до оптимізації інтермодальних мереж з одночасним урахуванням витрат, часу та екологічних вимог розглянуто Ламом та Гу [20]. Запропонована модель демонструє, що включення «зеленого» критерію у функцію оптимізації суттєво змінює конфігурацію мережі на користь залізничних ланок.

2.7 Поведінка вантажовідправників і вибір виду транспорту

Розуміння чинників, що визначають вибір транспортного засобу замовниками вантажних послуг, є необхідною умовою для прогнозування попиту на нову систему. Огляд емпіричних досліджень цього вибору, виконаний Флодемом, Бертелем та Соркіною [21], виявляє, що поряд із ціною та часом доставки вирішальну роль відіграють надійність (варіабельність часу), гнучкість і можливість відстеження вантажу в реальному часі – атрибути, закладені у концепцію цифрової залізничної мережі нового покоління.

3 Формування концепції магістральної залізничної мережі експрес-доставки на принципах крос-докінгу та хабових технологій

3.1 Формування залізничної мережі експрес-логістики Rail Express Network

Аналіз сучасних потреб ринку логістичних послуг вказує на необхідність створення принципово нової архітектури залізничних перевезень, яка б функціонувала за моделлю високошвидкісного мережевого оператора. У світовій практиці залізниці традиційно асоціюються з перевезенням масових вантажів великими партіями, тоді як сегмент дрібнопартійної доставки (LCL – Less than Container Load) та термінових вантажів майже повністю монополізований автомобільним транспортом. Проте, виклики повоєнного відновлення та вимоги європейської інтеграції ставлять перед залізничною інженерією задачу створення системи, що здатна забезпечити швидкість та гнучкість, порівнянну з операторами експрес-пошти, але з потужністю магістральної залізниці. Ключовим елементом такої системи має стати концепція мережевого крос-докінгу, що передбачає мінімізацію часу перебування вантажу на терміналах за рахунок виключення етапів тривалого складського зберігання.

В основі запропонованої концепції лежить перехід від лінійних маршрутів до розгалуженої хабової структури, де ключові залізничні вузли виконують роль автоматизованих сортувальних центрів. На відміну від традиційних сортувальних станцій, де відбувається переформування поїздів через розформування составів, залізничний крос-докінг базується на швидкому перевантаженні самих контейнерів між поїздами, що курсують за фіксованими маятниковими маршрутами. Це дозволяє реалізувати модель, де контейнер, що прибув з регіонального вузла, протягом 30–60 хвилин переміщується на магістральний експрес-поїзд, що прямує до міжнародного терміналу, наприклад, до Мостиської. Така технологія потребує впровадження високопродуктивних систем горизонтального перевантаження, що були розглянуті в

контексті MetroCargo, та повної цифровізації управління потоками для синхронізації графіків руху.

Створення такої «залізничної пошти» вимагає радикальної зміни підходів до проектування топології мережі. Якщо традиційна мережа будується за принципом найкоротшої відстані між точками, то мережа експрес-доставки з крос-докінгом має бути оптимізована за критерієм мінімального сумарного часу очікування у вузлах. Це означає, що розташування хабів та конфігурація зв'язків між ними повинні забезпечувати таку зв'язність графа, при якій будь-яка пара станцій з'єднана маршрутом з чітко визначеним часом прибуття (Arrival Window). Такий підхід дозволяє залізниці вийти на рівень сервісу Just-in-Time, пропонуючи клієнтам фіксовані «часові слоти» для навантаження та вивантаження (рис. 3.1.), що фактично нівелює переваги автомобільної логістики в оперативності.

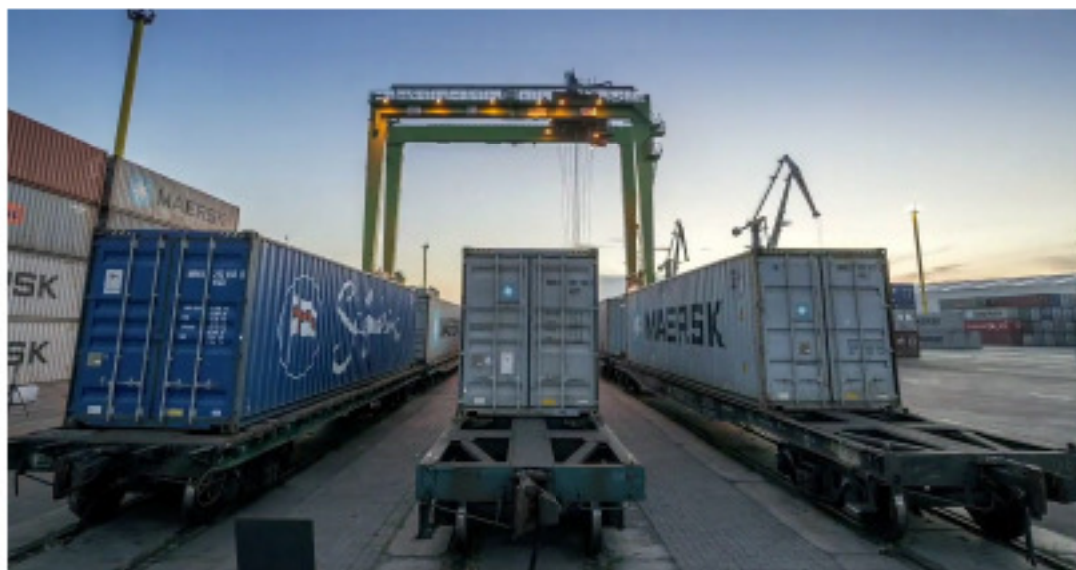


Рисунок 3.1 – Кросдокінг контейнерів між трьома контейнерними поїздами на станції

Більше того, залізничний експрес-оператор стає значно вигіднішим з точки зору екологічності та вартості на великих відстанях, зберігаючи при цьому «поштову» точність доставки.

Інженерна складність реалізації такої системи полягає в тому, що на відміну від автомобільних кур'єрських служб, залізничний транспорт має жорсткі обмеження по пропускній спроможності колій та необхідності координації з іншими типами поїздів. Це обумовлює перехід до стратегії Precision Scheduled Railroading (PSR), де кожен контейнерний поїзд розглядається як невід'ємна частина єдиного технологічного конвеєра. У цій моделі залізниця перестає бути просто набором рейок і вагонів, а перетворюється на складну кіберфізичну систему, де фізичне переміщення вантажу керується цифровим ядром у режимі реального часу. Саме такий підхід дозволяє реалізувати амбітну мету – створення першої у світі повномасштабної залізничної мережі швидкісної контейнерної доставки, яка б працювала за стандартами кращих поштових операторів.

Реалізація цієї концепції є центральною задачею даного дипломного дослідження. Для переходу від теоретичних міркувань до інженерних розрахунків необхідно розробити інструментарій для математичного моделювання такої мережі. Це включає визначення оптимальної кількості хабів, розрахунок їх пропускної спроможності та формування структури зв'язків, що забезпечували б максимальну стійкість системи до динамічних змін попиту. Таким чином, подальші розділи роботи присвячені розробці математичної моделі багатокритеріальної оптимізації топології контейнерної мережі та створенню архітектури її цифрового двійника. Це дозволить не лише теоретично обґрунтувати можливість створення «залізничного експресу», а й отримати конкретні проектні рішення для трансформації транспортної системи України в сучасний, екологічний та надшвидкий логістичний комплекс.

3.2 Аналіз світового досвіду та технологічних прецедентів впровадження експрес-систем залізничних перевезень

Світова практика функціонування залізничного транспорту протягом останніх десятиліть демонструє стійку тенденцію до пошуку рішень, які могли б наблизити залізничну логістику до стандартів оперативності автомобільних перевезень. Хоча концепція інтегрованої національної мережі залізничного крос-докінгу є унікальною пропозицією даного дослідження, у світі існують окремі прецеденти та моделі, що базуються на схожих принципах. Найбільш релевантним досвідом у контексті підвищення операційної ефективності є північноамериканська модель Precision Scheduled Railroading (PSR), яка за останні роки радикально трансформувала роботу найбільших залізниць першого класу в США та Канаді. Суть PSR полягає у відмові від традиційної орієнтації на вантаж (Unit Trains) на користь жорсткої орієнтації на графік руху. Це дозволяє забезпечити регулярність і прогнозованість доставки, що є фундаментом для систем типу Just-in-Time, проте американська модель все ще орієнтована на масивні поїзди, що створює бар'єр для дрібнопартійної експрес-доставки.

Більш близьким до ідеї «залізничної пошти» є досвід Китайських залізниць (China Railway), які активно використовують швидкісні магістралі для перевезення дрібних посилок та e-commerce вантажів. У Китаї під час пікових навантажень (наприклад, «День холостяка») використовуються спеціально переобладнані високошвидкісні пасажирські поїзди, де замість крісел встановлені стелажі для контейнерів. Цей приклад демонструє можливість досягнення швидкостей понад 200–250 км/год у залізничній логістиці, проте він обмежений використанням пасажирської інфраструктури та не передбачає складних крос-докінгових операцій у проміжних хабах. Українська ж концепція, що розробляється в даній роботі, передбачає створення спеціалізованої вантажної мережі, де швидкість досягається не лише за рахунок тяги, а насамперед за рахунок оптимізації топології та мінімізації часу обробки контейнера у вузлі.

У Європейському Союзі найбільш близьким технічним аналогом є проект CargoBeamer та ініціативи компанії DB Cargo щодо створення мережі швидкісних контейнерних шаттлів. CargoBeamer використовує спеціалізовані термінали для автоматизованого горизонтального перевантаження напівпричепів, що за своєю

логікою ідентично системі MetroCargo, розглянутій у попередніх розділах. Однак європейська модель зазвичай фокусується на довгих трансконтинентальних плечах, залишаючи внутрішні короткі дистрибуційні мережі автомобільному транспорту. У цьому контексті українська модель має потенціал стати першим у світі прикладом масштабного впровадження принципу «дифузного крос-докінгу», де мережа дрібних та середніх хабів дозволяє залізниці ефективно працювати на дистанціях від 150 до 400 км, що раніше вважалося виключною прерогативою фур.

Аналогія з поштовими операторами, такими як «Нова Пошта» або DHL, у даному дослідженні не є суто метафоричною. Вона базується на запозиченні математичних алгоритмів маршрутизації (Hub-and-Spoke model), які успішно працюють в авіаційній та автомобільній експрес-доставці, але досі не були адаптовані до специфіки залізничного графа з його жорсткими обмеженнями пропускної спроможності. Унікальність запропонованого в дипломній роботі підходу полягає в тому, що залізниця розглядається як єдиний конвеєр, де роль сортувальних стрічок виконують магістральні колії, а роль розподільчих пунктів – автоматизовані хаби з нульовим часом складського зберігання.

Досвід Японії (Japan Freight Railway) також заслуговує на увагу через використання контейнерних поїздів серії M250 «Super Rail Cargo», які мають конструкцію, схожу на електропоїзди, і здатні розвивати високі швидкості при малій масі состава. Це підтверджує технічну можливість створення легких, маневрових контейнерних поїздів, які є ідеальними для моделі крос-докінгу. Проте японська система є ізольованою та замкненою, тоді як українська мережа має бути інтегрована в загальноєвропейський простір, що вимагає складніших алгоритмів оптимізації зв'язності та сумісності.

Отже, накопичений світовий досвід засвідчує, що всі необхідні складники для побудови мережі швидкісних залізничних перевезень у режимі експрес-доставки вже існують: система PSR забезпечує належний графік руху, технологія MetroCargo – швидке перевантаження, а напруцювання Китаю та Японії – високошвидкісний рухомий склад. Водночас жодна з наявних систем не об'єднує ці елементи в єдину цілісну мережу, керовану за допомогою цифрового двійника. Це створює наукове

вікно можливостей для представленого дослідження: розробити теоретичну модель та практичний алгоритм оптимізації топології такої мережі, яка дозволила б Україні реалізувати проект залізничного експресу світового рівня.

4 Математична формалізація та постановка задачі оптимізації топології контейнерної мережі

4.1 Математична формалізація структури транспортного графа та багатокритеріальна постановка задачі оптимізації мережі

Проектування високоефективної мережі залізничної експрес-доставки, здатної функціонувати в режимі крос-докінгу, вимагає переходу від емпіричних методів планування до строгих математичних моделей. У межах даного дослідження транспортна система України представляється у вигляді неорієнтованого зваженого графа $G = (V, E)$, де множина вершин V відповідає залізничним станціям та термінальним хабам, а множина ребер E відображає існуючі або перспективні залізничні перегони між ними. Кожному ребру графа присвоюється ваговий коефіцієнт, що відповідає фізичній відстані або часу ходу поїзда, що дозволяє враховувати географічні обмеження реальної мережі. Формалізація задачі полягає у пошуку такої сукупності ребер (маршрутних зв'язків), яка б забезпечувала оптимальне співвідношення між експлуатаційними витратами та якістю логістичного сервісу.

Особливістю запропонованої моделі є врахування п'яти фундаментальних критеріїв оптимізації, які дозволяють збалансувати інтереси перевізника та клієнта. Першим критерієм виступає мінімізація загальної кількості поїздів у системі, що прямо корелює з операційними витратами та навантаженням на інфраструктуру. Другим, не менш важливим параметром, є час доставки вантажів, який у термінах теорії графів виражається через середню довжину найкоротших шляхів між усіма парами вершин. Третій критерій спрямований на забезпечення структурної рівномірності мережі – це мінімізація відхилення значень власної центральності станцій (англ. Eigenvector Centrality). Це необхідно для того, щоб уникнути надмірної концентрації вантажопотоків у обмеженій кількості вузлів, що підвищує живучість системи та її стійкість до відмов окремих елементів.

Критерії формалізують необхідність впровадження хабових технологій через оптимізацію кількості вузлів з високим ступенем зв'язності. У моделі вони виступають як опорні пункти крос-докінгу, де відбувається консолідація та перерозподіл контейнерів. Критерії забезпечують балансування навантаження поїздів, рівномірність використання пропускної спроможності і рухомого складу. Така багатокритеріальна постановка робить задачу NP-складною, оскільки покращення одного показника (наприклад, швидкості доставки) неминуче призводить до погіршення іншого (наприклад, збільшення кількості поїздів або концентрації навантаження).

Для вирішення цієї суперечності у роботі застосовується апарат еволюційного моделювання, зокрема адаптований генетичний алгоритм NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II). Вибір даного методу обумовлений його здатністю знаходити множину рішень Парето-оптимального фронту, що дозволяє особі, яка приймає рішення, обирати найкращу конфігурацію мережі залежно від пріоритетів (наприклад, максимальна швидкість проти мінімальних витрат). В алгоритм інтегровані специфічні обмеження, такі як вимога повної зв'язності графа та механізм «схлопування» транзитних станцій. Останнє є критично важливим для залізничної специфіки, оскільки дозволяє виключати з розгляду другорядні станції, де не проводяться вантажні операції, зосереджуючи обчислювальний ресурс на магістральних зв'язках між ключовими терміналами.

Математична новизна підходу полягає у використанні показників алгебраїчної зв'язності та спектрального радіуса графа як індикаторів структурної цілісності майбутньої мережі експрес-доставки. Це дозволяє ще на етапі проектування відсікати топології, які схильні до утворення «пляшкових шийок» (bottlenecks). Таким чином, формалізована модель стає фундаментом для створення цифрового двійника транспортної системи, де кожна зміна у структурі графа миттєво відображається на прогностичних показниках швидкості доставки контейнерів та загальної енергоефективності мережі відповідно до стандартів Green Deal. Такий аналітичний підхід дозволяє трансформувати інтуїтивне планування у строгий

інженерний розрахунок, що є необхідною умовою для створення залізничного оператора нового покоління.

4.2 Обґрунтування критеріїв багатокритеріальної оптимізації транспортної мережі

4.2.1. Критерій мінімізації кількості поїздів у системі

Перша цільова функція спрямована на оптимізацію використання рухомого складу та пропускної спроможності залізничних ділянок. З точки зору оператора перевезень, надмірна кількість маршрутів призводить до розпорошення ресурсів, збільшення витрат на локомотивну тягу та ускладнення диспетчерського управління.

Критерії операційної ефективності та балансування системи є одним з головних операційних критеріїв є баланс використання рухомого складу, що забезпечує рівномірність навантаження на локомотиви та бригади:

$$f_1 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2} \rightarrow \min, \quad (4.1)$$

де T_i – тривалість повного циклу роботи i -го поїзда (включаючи маятниковий рух та час на терміналах), а $\bar{T}$ – середня тривалість циклу по мережі.

Мінімізація кількості поїздів (або ребер графа, що обслуговуються) дозволяє сформувати «кістяк» мережі, де кожен маршрут має стабільно високе завантаження. Це прямо відповідає принципам Precision Scheduled Railroading (PSR), оскільки дозволяє створити жорсткий графік руху для обмеженої кількості магістральних сполучень, максимізуючи при цьому коефіцієнт використання вантажних платформ та знижуючи питому собівартість перевезення одного контейнера.

4.2.2. Критерій мінімізації середнього часу доставки вантажів

Цей критерій є визначальним для забезпечення конкурентоспроможності залізниці відносно автомобільного транспорту. Математично він виражається через середню довжину найкоротших шляхів між усіма парами вершин графа. Оптимізація цього показника дозволяє мінімізувати кількість проміжних станцій та маневрових операцій. У контексті експрес-логістики зменшення часового бюджету перевезення дозволяє реалізувати модель «від дверей до дверей» у межах цільових вікон, затребуваних ринком. Зменшення середньої відстані у графі безпосередньо впливає на енергоефективність системи, оскільки скорочує сумарний пробіг рухомого складу, що є ключовим індикатором виконання вимог Green Deal.

4.2.3. Критерій рівномірності власної центральності станцій

Використання показника власної центральності (Eigenvector Centrality) є інноваційним підходом до оцінки структурної стійкості залізничної мережі. На відміну від простого ступеня вершини, власна центральність враховує не лише кількість зв'язків станції, а й важливість сусідніх вузлів. Мінімізація стандартного відхилення цього показника по всій мережі дозволяє досягти структурної рівномірності. Це критично важливо для уникнення створення «надвузлів», перевантаження яких може призвести до колапсу всієї системи. Рівномірний розподіл центральності забезпечує високу живучість мережі: у разі виходу з ладу або тимчасового закриття одного з хабів, вантажопотоки можуть бути оперативно перерозподілені без критичних втрат у часі доставки.

4.2.4. Критерій оптимізації кількості вузлів з підвищеною зв'язністю

Цей критерій формалізує хабову архітектуру мережі, необхідну для реалізації технології крос-докінгу. Математична постановка передбачає виявлення обмеженої кількості вершин з високим ступенем зв'язності, які виступають опорними центрами консолідації вантажів. Саме в цих точках передбачається встановлення систем швидкого перевантаження контейнерів типу MetroCargo. Оптимізація кількості таких хабів є балансом між складністю інфраструктури та логістичною гнучкістю: надто велика кількість хабів здорожує систему, а надто мала – збільшує пробіги на «останній милі». Формування чіткої ієрархії вузлів дозволяє реалізувати модель Hub-and-Spoke, яка є стандартом для світових лідерів експрес-доставки.

Для мінімізації капітальних витрат на інфраструктуру хабів та рухомий склад вводяться критерії кількості вузлів та поїздів:

$$f_2 = count(V_{hubs}) \rightarrow \min, \quad (4.2)$$

$$f_3 = |E_{mod}| \rightarrow \min, \quad (4.3)$$

де E_{mod} – множина ребер модифікованого графа після видалення транзитних вершин, що відображає кількість необхідних маршрутних плечей.

4.2.5. Критерій балансування навантаження поїздів

Останній критерій спрямований на вирівнювання інтенсивності експлуатації різних маршрутів у межах графа. Балансування навантаження (Load Balancing)

дозволяє уникнути ситуацій, коли одні ділянки мережі працюють на межі пропускної спроможності, а інші залишаються недовантаженими. Це забезпечує ритмічність роботи терміналів та дозволяє впроваджувати маятниковий рух поїздів з однаковою кількістю вагонів, що спрощує технічне обслуговування та планування локомотивних бригад. Збалансоване навантаження є необхідною умовою для створення цифрового двійника системи, оскільки дозволяє будувати стабільні імітаційні моделі вантажопотоків та уникати динамічних заторів у мережі.

4.2.6. Клієнтські критерії та структурна стійкість

Для задоволення вимог вантажовласників щодо швидкості та стабільності доставки використовується критерій середньоквадратичного терміну доставки між усіма парами станцій S :

$$f_4 = \sqrt{\frac{1}{|S|} \sum_{(u,v) \in S} (t_{uv})^2} \rightarrow \min, \quad (4.4)$$

де t_{uv} – найкоротший час доставки між станціями u та v згідно з топологією графа.

4.3 Модель векторної оптимізації

Підсумкова оптимізаційна модель формулюється як задача пошуку вектора рішень, що мінімізує сукупність критеріїв:

$$F(x) = (f_1, f_2, f_3, f_4) \rightarrow \min, \quad x \in \Omega, \quad (4.5)$$

При цьому обов'язковою умовою є алгебраїчна зв'язність графа, що контролюється через число Фідлера (друге найменше власне значення матриці Лапласа L):

$$\lambda_2(L) > 0. \quad (4.6)$$

Це обмеження гарантує, що при будь-яких генетичних мутаціях топології мережа не розпадеться на ізольовані сегменти, зберігаючи цілісність системи експрес-доставки.

Для того щоб забезпечити наукову глибину та необхідний обсяг дипломної роботи, ми маємо детально описати інструментарій, за допомогою якого здійснюється пошук оптимальної топології. Наступний підрозділ присвячений адаптації генетичного алгоритму та специфічним інженерним методам обробки транспортної мережі.

5 Формування процедури оптимізації і проведення моделювання

5.1. Механізми генетичного пошуку та оператори модифікації графа

Складність поставленої задачі, що характеризується великою кількістю суперечливих критеріїв та високою розмірністю простору пошуку, обумовлює необхідність застосування сучасних евристичних методів. У даному дослідженні базовим інструментом обрано генетичний алгоритм NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II), який є одним із найбільш ефективних методів пошуку Парето-оптимальних рішень у задачах багатокритеріальної оптимізації. Проте, стандартна реалізація алгоритму потребує суттєвої адаптації до специфіки залізничних мереж, де кожен індивід у популяції представляє собою конкретну топологію графа залізничних сполучень.

Процес оптимізації починається з генерації початкової популяції, де кожен хромосомний набір кодує структуру ребер графа G . Основними операторами еволюційного процесу є мутація та кросинговер, які у даному контексті мають специфічну інженерну інтерпретацію. Оператор мутації відповідає за випадкове додавання або видалення залізничних сполучень між станціями, що дозволяє алгоритму досліджувати нові топологічні конфігурації та уникати потрапляння у локальні екстремуми. Оператор кросинговеру забезпечує обмін структурними блоками між двома «батьківськими» мережами, дозволяючи комбінувати найбільш ефективні фрагменти маршрутів для отримання «нащадків» з покращеними логістичними показниками. Важливою особливістю реалізації є впровадження фільтрів життєздатності: після кожної генетичної операції алгоритм перевіряє граф на повну зв'язність за допомогою алгоритму пошуку в ширину (BFS) або аналізу матриці суміжності. Графи, що розпадаються на ізольовані підсистеми, автоматично відсіваються або піддаються процедурі відновлення зв'язності, що гарантує цілісність майбутньої мережі експрес-доставки.

Для розв'язання багатокритеріальних оптимізаційних задач потрібно застосовувати спеціалізовані генетичні алгоритми, призначені для пошуку векторів, що належать множині Парето. Серед таких алгоритмів, які показують найкращі результати, насамперед варто виділити генетичний алгоритм недомінованого сортування з елітизмом NSGA-II (англ. elitist non-dominated sorting genetic algorithm). Цей алгоритм належить до класичних генетичних алгоритмів, оскільки в процесі його роботи відбувається зміна поколінь розв'язків.

Його ключовою особливістю є те, що паралельно з пошуком нових розв'язків він виконує недоміноване сортування. Завдяки цьому оновлюється множина знайдених Парето-оптимальних розв'язків: додаються нові вектори, а старі, які після додавання нових стають домінованими, видаляються. Під час роботи алгоритм відбирає ті вектори розв'язків, які мають конкурентоспроможні поєднання значень цільових функцій (рисунок 5.1).

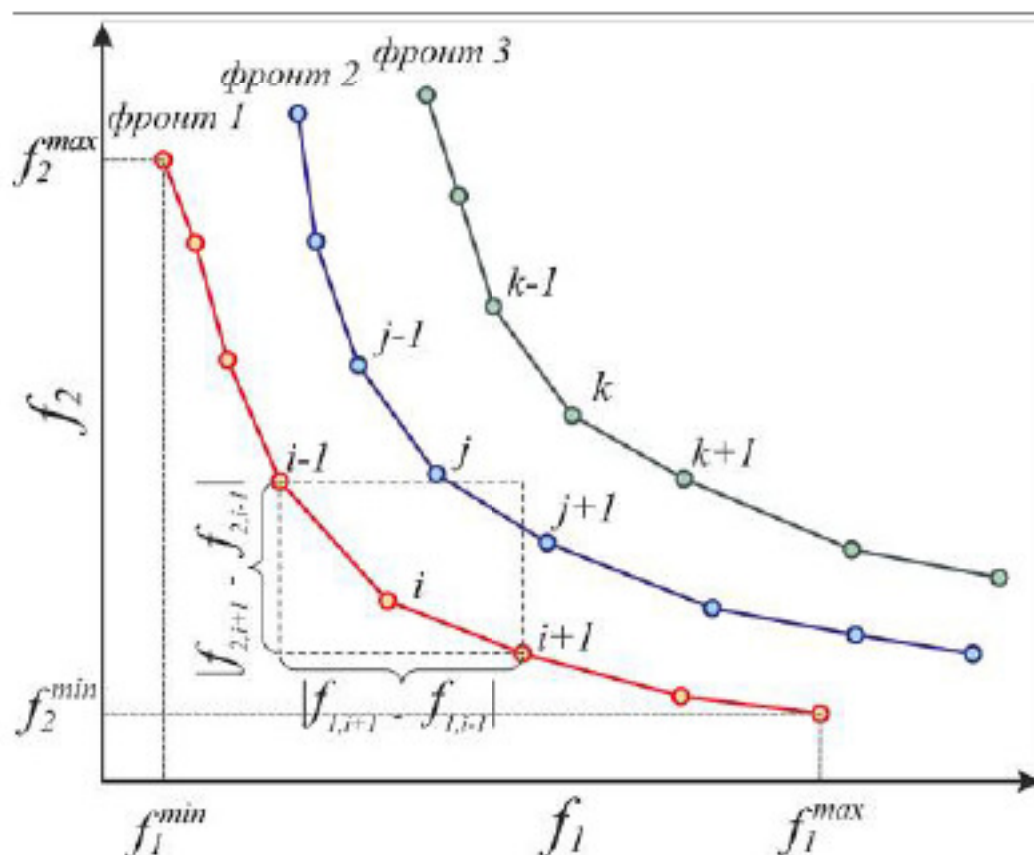


Рисунок 5.1 – Парето-фронти за рангами та визначення величин для розрахунку відстані скупченості (середньої довжини ребра кубоїда)

Із цієї множини за допомогою процедури недовіданого ранжування послідовно будуються кілька шарів — фронтів Парето. Перший фронт має ранг 1 і є актуальним Парето-фронтом. Фронти з вищими рангами обчислюються після тимчасового вилучення векторів фронтів із меншими рангами.

Отже, Парето-фронти з вищим рангом містять гірші рішення. Вони необхідні для підтримки різноманітності розв'язків під час роботи генетичного алгоритму. Коли формуються фронти з чергової популяції, з неї виділяється різна кількість рішень, яка зазвичай перевищує заздалегідь заданий розмір елітної популяції N . Тому цю множину рішень додатково відбирають за допомогою так званої відстані скупченості (англ. crowding distance). Ця відстань являє собою середню довжину ребра гіперкубоїда (рис. 5.1) і обчислюється за наведеною нижче формулою:

$$d = \sum_{m=1}^M \frac{|f_{m,i+1} - f_{m,i-1}|}{f_m^{\max} - f_m^{\min}}, \quad (5.1)$$

де M — кількість цільових функцій, $f_{m,i+1}, f_{m,i-1}$ — значення m -ої функції в найближчих точках фронту, між якими знаходиться точка, для якої визначається відстань скупченості, $f_m^{\max}, f_m^{\min}$ — максимальне і мінімальне значення m -ої функції фронту, до якого належить точка.

Таким чином вважаються кращими і переходять до наступної популяції ті вектори, які мають більшу величину відстані скупченості, адже вони вважаються більш унікальними у своїй області фронту.

Порядок виконання операцій алгоритму NSGA-II наведений на рисунку 5.2.

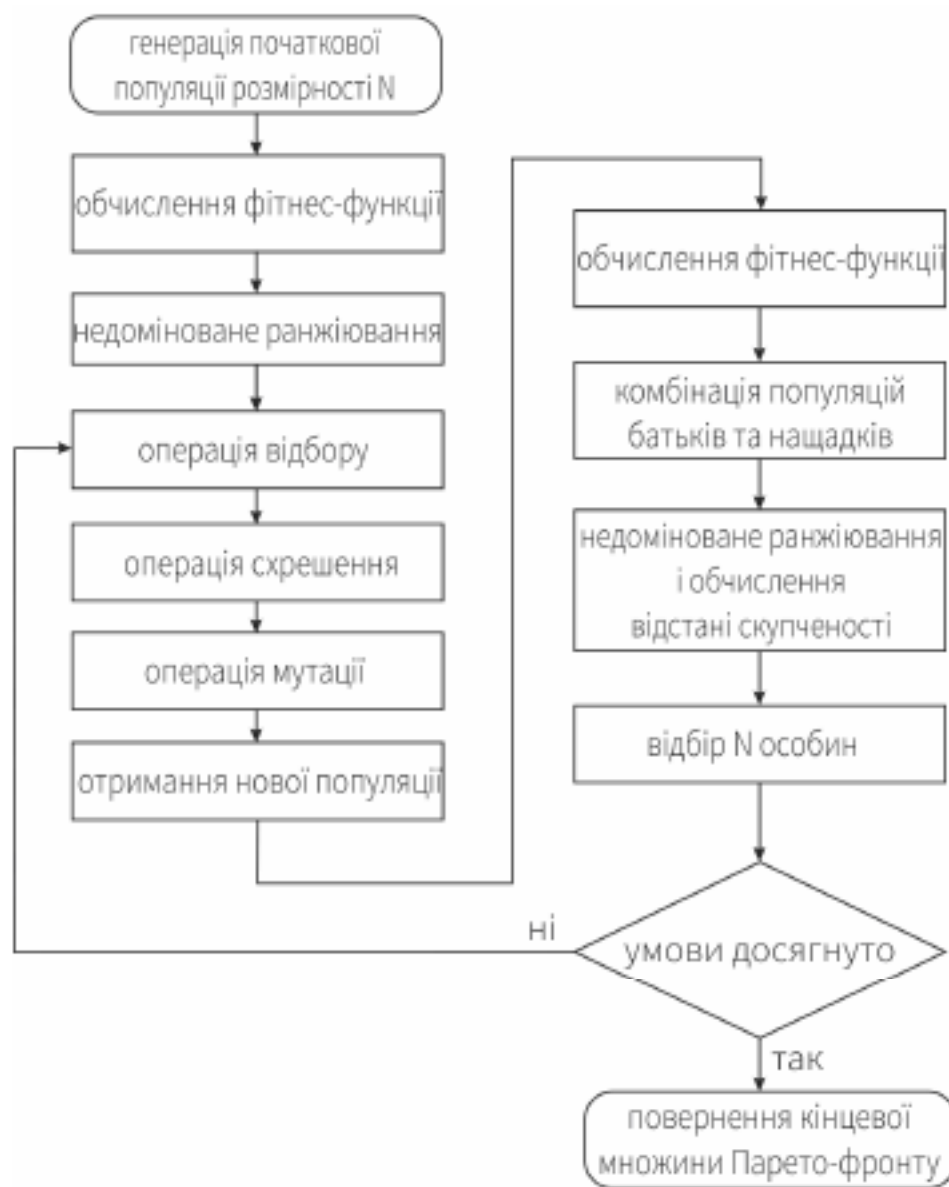


Рисунок 5.2 – Парето Процес Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)

5.2. Механізм «схлопування» транзитних станцій та спрощення топології

Одним із найбільш значущих наукових результатів, представлених у роботі, є впровадження механізму «схлопування» (collapsing) транзитних вузлів. У реальній залізничній мережі існує велика кількість станцій, які виконують лише технічну функцію пропуску поїздів без проведення вантажних операцій. Врахування кожної

такої станції як повноцінної вершини графа призводить до надмірного ускладнення обчислень та розмивання ключових логістичних показників. Запропонований алгоритм автоматично ідентифікує транзитні вершини зі ступенем зв'язності рівним двом та замінює їх єдиним ребром, вага якого дорівнює сумі відстаней суміжних ділянок. Це дозволяє зосередити оптимізаційний пошук на взаємодії ключових вантажоутворюючих пунктів та термінальних хабів, значно підвищуючи швидкість збіжності алгоритму та якість отриманих рішень. Така декомпозиція графа дозволяє отримати «структурне ядро» мережі, яке є найбільш релевантним для завдань стратегічного планування контейнерних потоків.

5.3. Обмеження алгебраїчної зв'язності та спектральний аналіз

Для забезпечення структурної стійкості мережі до алгоритму введено обмеження на основі спектральної теорії графів. Зокрема, використовується показник алгебраїчної зв'язності, що відповідає другому найменшому власному значенню матриці Лапласа графа. Цей параметр є індикатором того, наскільки легко мережу можна розділити на два ізольовані кластери. У процесі оптимізації через NSGA-II, алгоритм віддає перевагу топологіям з вищим значенням алгебраїчної зв'язності, що гарантує високу живучість мережі в умовах можливих пошкоджень інфраструктури або технічних збоїв. Таким чином, отримані рішення Парето-фронту є не просто математичними абстракціями, а інженерно обґрунтованими схемами, які забезпечують баланс між мінімальною довжиною маршрутів та максимальною надійністю системи.

Результатом роботи адаптованого алгоритму є множина альтернативних конфігурацій мережі, кожна з яких представляє собою збалансований варіант розвитку залізничної експрес-логістики. Отримані дані стають фундаментом для наступного етапу – формування архітектури цифрового двійника, де вибрана топологія виступає як статичний каркас для динамічного моделювання

вантажопотоків у режимі реального часу. Це дозволяє перетворити результати оптимізації на життєздатний інструмент підтримки прийняття управлінських рішень для АТ «Укрзалізниця».

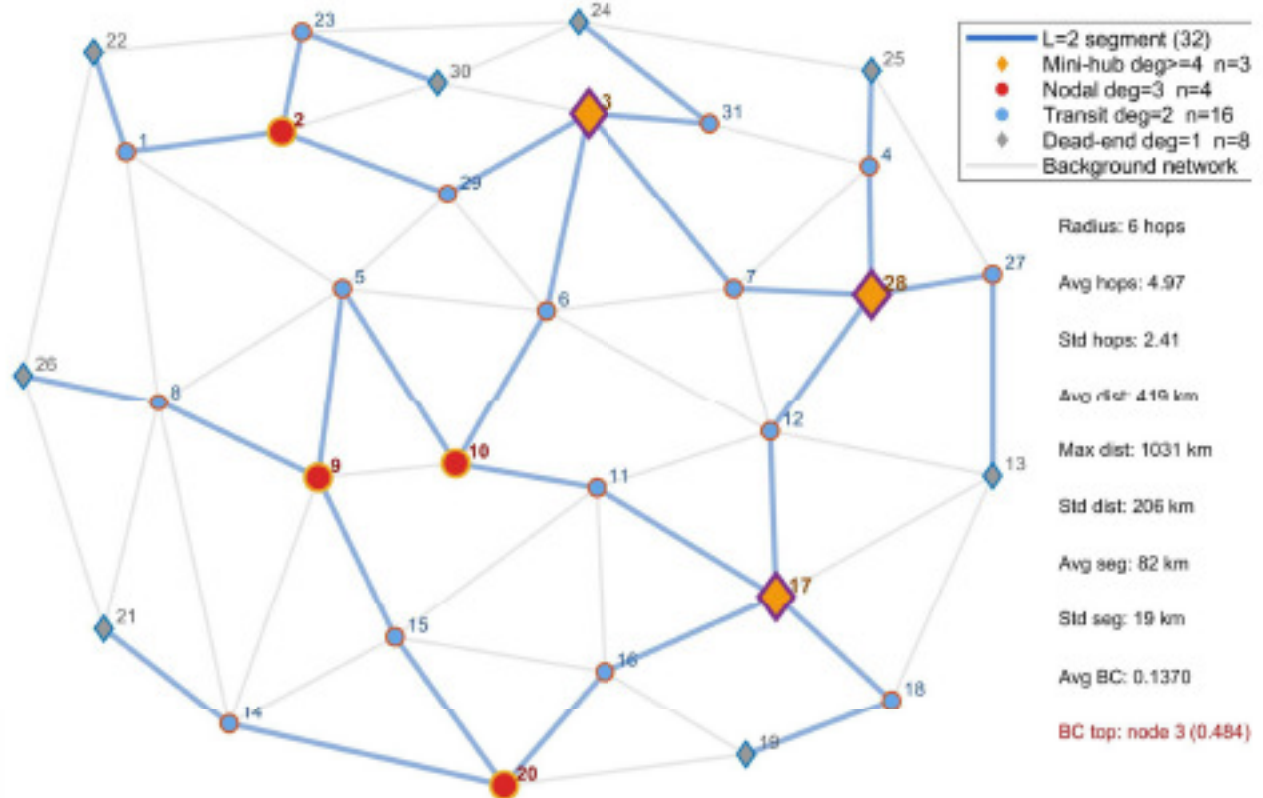


Рисунок 5.3 – Граф експрес-логістичної мережі доставки контейнерів, та деякі його метрики

Результати аналізу топологічних характеристик отриманої мережі наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Метрики результуючої транспортної мережі

Метрика	Значення	Оцінка
Кількість станцій	31	Full polygon
Кількість проміжних ділянок	32	—
Перевантажувальні станції (deg ≥ 4)	3	вершини 3, 17, 28
Перевантажувальні станції (deg = 3)	4	вершини 2, 9, 10, 20
Транзитні станції (deg = 2)	16	—
Тупикові термінальні станції (deg = 1)	8	вершини

		13,19,21,22,24,25,26,30
Діаметер (проміжних ділянок)	11	Прийнятна
Радіус (проміжних ділянок)	6	Хороша
Середня кількість проміжних ділянок на маршрут доставки	4.97	Хороша
Середня кількість проміжних ділянок на маршрут доставки	2.41	Середня
Avg pairwise dist (km)	419	—
Max pairwise dist (km)	1031	—
Стандартне відхилення попарних відстаней (км)	206	—
Середня протяжність проміжної ділянки (км)	82	—
Середня центральність по посередництву (Avg betweenness centrality)	0.137	—
Максимальна центральність по посередництву (Max betweenness centrality (node 3))	0.484	Ризик вузького місця
Цикломатичне число	2	Низька надлишковість

6 Архітектура цифрового двійника транспортної системи

6.1. Трирівнева архітектура цифрового двійника залізничної мережі експрес-доставки та її функціональна декомпозиція

Для забезпечення високої точності моделювання та можливості оперативного управління процесом експрес-доставки в умовах динамічної зміни вантажопотоків, концепція залізничної мережі реалізується через створення її повнофункціонального цифрового двійника. На відміну від класичних імітаційних моделей, цифровий двійник являє собою інтегроване програмно-математичне середовище, яке забезпечує безперервну синхронізацію між віртуальною копією транспортної системи та її фізичним оригіналом. Архітектура такого двійника будується за трирівневим принципом, де кожен рівень відповідає за специфічний аспект функціонування логістичного конвеєра. Перший рівень – статико-топологічний – виступає фундаментом системи та базується на результатах багатокритеріальної оптимізації через алгоритм NSGA-II. Він жорстко фіксує просторову структуру мережі, визначаючи оптимальне розташування термінальних хабів, конфігурацію магістральних колій та параметри пропускної спроможності кожного вузла. Цей рівень фактично описує геометричний «скелет» мережі, який залишається незмінним у короткостроковій перспективі та визначає граничні можливості системи щодо обробки контейнерних потоків.

Другий рівень архітектури є процесно-динамічним і призначений для моделювання часових характеристик руху поїздів та операцій крос-докінгу. Саме на цьому етапі реалізуються принципи Precision Scheduled Railroading (PSR), де кожен елемент транспортного процесу розглядається як дискретна подія у часі. Для опису взаємодії складних паралельних процесів, таких як одночасне прибуття контейнерних поїздів з різних напрямків та їх миттєве перевантаження за технологією MetroCargo, використовується апарат кольорових мереж Петрі. Це дозволяє не лише візуалізувати рух вантажів, а й математично точно виявляти

потенційні «пляшкові шийки» (bottlenecks) та розраховувати оптимальні часові вікна для синхронізації роботи терміналів. Динамічний рівень дозволяє програвати сценарії «що, якщо», оцінюючи вплив затримок на одному сегменті мережі на стабільність усієї системи доставки, що є критично важливим для дотримання жорстких графіків, аналогічних поштовим операторам.

Верхній, когнітивно-адаптивний рівень цифрового двійника, відповідає за підтримку прийняття рішень та автоматичну корекцію параметрів мережі. Він використовує дані, отримані з попередніх рівнів, для прогнозування майбутніх станів системи та оптимізації енергетичних і експлуатаційних витрат. Завдяки інтеграції методів інтелектуального аналізу даних, система здатна самостійно пропонувати зміни у маршрутизації контейнерів у разі виникнення позаштатних ситуацій або різкого зростання попиту на конкретних напрямках. Таким чином, цифрова копія перетворюється на активний інструмент управління, який дозволяє залізниці функціонувати як єдиний, чітко налагоджений механізм швидкої доставки. Використання такої багаторівневої структури гарантує, що розроблена мережа буде не лише теоретично ефективною, а й придатною для реального впровадження у практику АТ «Укрзалізниця» як ключовий елемент цифрової трансформації транспортної галузі.

6.2 Формальне визначення та алгебраїчна семантика мережі Петрі для задачі побудови графіка руху

Концепція цифрового двійника (ЦД) залізничної системи потребує наявності обчислювального ядра, здатного не лише імітувати рух, а й аналітично визначати параметри синхронізації процесів. У даній роботі для моделювання розкладу використано апарат часових мереж Петрі, що дозволяє формалізувати паралельні дискретно-подієві процеси з чіткими часовими затримками.

Часові мережі Петрі (ЧМП) є розширенням класичного апарату мереж Петрі, яке дозволяє враховувати динамічні характеристики складних систем шляхом введення часових параметрів у структуру моделі. На відміну від стандартних моделей, де переходи спрацьовують миттєво, ЧМП дозволяють формалізувати тривалість технологічних операцій, таких як рух поїздів перегонами та процеси перевантаження на вузлових станціях.

Часова мережа Петрі визначається як впорядкований кортеж $M=(P,T,F,W,D,M_0)$, де:

- P – скінченна множина позицій, що моделюють стани системи (наприклад, перебування поїзда на маршруті);
- T – скінченна множина переходів, що моделюють події (прибуття, початок перевантаження, відправлення);
- $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ – множина орієнтованих дуг;
- $W : F \rightarrow \mathbb{N}$ – функція ваг дуг, що визначає кількість ресурсів (токенів), необхідних для активації події;
- $D : T \rightarrow \mathbb{R}^+$ – функція часових затримок, що призначає кожному переходу тривалість виконання відповідної операції;
- $M_0 : P \rightarrow \mathbb{N}$ – початкова розмітка (маркування), що задає початковий стан системи та розташування рухомого складу.

Ключовою відмінністю ЧМП є механізм спрацювання: перехід t активується, коли кожна вхідна позиція містить достатню кількість токенів, проте власне переміщення токенів до вихідних позицій відбувається лише після завершення часу затримки $D(t)$. Це дозволяє точно моделювати часову детермінованість транспортних циклів.

Переваги ЧМП як обчислювального ядра цифрового двійника. Використання ЧМП замість традиційних імітаційних методів або алгоритмів на основі машинного навчання обумовлено наступними факторами:

1. Суворі математична семантика: На відміну від імітаційних моделей, які є програмними реалізаціями без глибокого теоретичного підґрунтя, мережі Петрі

мають чітко визначені правила переходу та досяжності станів. Це дозволяє аналітично досліджувати властивості системи, а не просто спостерігати за її поведінкою.

2. Доведення існування та єдиності режиму: Формалізм ЧМП дозволяє математично довести, що за заданих параметрів інфраструктури система обов'язково вийде на сталий (синхронізований) режим роботи. Це критично важливо для залізничного транспорту, де стабільність розкладу є пріоритетом.

3. Здатність до самосинхронізації: ЧМП демонструють властивість стійкості до початкових умов. Експериментально встановлено, що незалежно від початкового маркування (M_0), система автоматично приходить до єдиного оптимального періоду курсування T_c , що свідчить про внутрішню здатність моделі до самоорганізації.

Моделювання маятникових систем із крос-докінгом. У залізничних мережах з крос-докінгом переходи мережі Петрі моделюють вузлові станції, де відбувається обмін контейнерами між різними напрямками. Специфіка ЧМП дозволяє реалізувати логіку «всі поїзди повинні прибути до вузла перед початком перевантаження», що є основою технології крос-докінгу.

Обчислювальна складність алгоритмів на основі ЧМП є лінійною відносно кількості подій у системі, що забезпечує роботу цифрового двійника в режимі реального часу. Це дозволяє автоматично перераховувати розклад при будь-яких змінах параметрів мережі (наприклад, зміні часу ходу через погодні умови або ремонтні роботи) без втручання диспетчера.

Для досліджуваної мережі, що містить 31 вузлову станцію та 32 з'єднувальні сегменти, побудовано математичну модель $M=(P,T,F,W,D,M_0)$. Відображення фізичних об'єктів на елементи мережі Петрі виконано за такими правилами:

1. Вузлові станції (Переходи T): Кожна станція (від S_1 до S_{31}) представлена переходом t_i . Спрацювання переходу моделює процес крос-докінгу (перевантаження контейнерів). Часова затримка переходу $D(t_i)$ відповідає технологічному часу t_r , необхідному для накопичення та обробки всіх поїздів, що прибувають до вузла.

2. Маршрути (Позиції P): Кожне ребро транспортного графа (сегмент) породжує дві антипаралельні позиції p_{ij} та p_{ji} , що відповідають руху поїзда у прямому та зворотному напрямках. Часова затримка позиції дорівнює часу ходу поїзда перегоном t_{ij} .

3. Рухомий склад (маркування M_0): початкове маркування передбачає наявність одного токена в циклі «позиція–перехід» для кожного маршруту, що відображає роботу одного маятникового поїзда на плечі.

6.3 Побудова часової мережі

Однією з ключових задач організації контейнерних перевезень у мережах із крос-докінговими технологіями є побудова узгодженого графіка руху маятникових поїздів. Особливість таких систем полягає у необхідності синхронізації прибуття поїздів до вузлових станцій для виконання перевантаження контейнерів без проміжного складування. На відміну від класичних систем, де поїзди можуть накопичуватись на сортувальних станціях у довільному режимі, крос-докінг вимагає часової координації всіх суміжних маршрутів. Порушення синхронізації призводить або до простоїв рухомого складу, або до неможливості виконання перевантаження.

У традиційних задачах побудови графіка руху переважно використовуються методи математичного програмування, евристичні алгоритми або імітаційне моделювання. Однак такі підходи мають низку обмежень при використанні в системах цифрових двійників транспортної мережі. По-перше, вони орієнтовані на офлайн-розрахунок і погано пристосовані до оперативного перерахунку графіка при зміні параметрів мережі. По-друге, більшість з них не мають формального апарату для доведення властивостей знайденого режиму роботи системи. Імітаційна модель може демонструвати певну поведінку, але не дозволяє аналітично підтвердити, що знайдений графік є єдиним усталеним режимом.

У зв'язку з цим доцільним є використання часових мереж Петрі як формального математичного апарату для побудови та аналізу графіка руху маятникових поїздів. Часові мережі Петрі дозволяють описувати транспортну систему як дискретно-подієву динамічну систему, у якій рух поїздів, їх очікування та процеси перевантаження контейнерів формалізуються у вигляді переходів і позицій мережі.

Побудова часової мережі Петрі для моделювання графіка руху маятникових контейнерних поїздів виконувалась на основі попередньо сформованої топології транспортної мережі CargoSprinter. Вихідна мережа являє собою граф, у якому вершини відповідають вузловим станціям, а ребра – можливим маршрутам руху поїздів між ними. На відміну від класичних задач побудови транспортних графів, дана структура формувалась не як абстрактна транспортна схема, а як потенційна основа для організації синхронізованого маятникового руху контейнерних поїздів з технологією крос-докінгу. Це означало, що мережа повинна була не лише забезпечувати зв'язність між вузлами, але й дозволити формування циклічних транспортних процесів, у межах яких поїзди безперервно циркулюють між станціями, здійснюючи перевантаження контейнерів без тривалого накопичення на складах.

Після формування графової структури транспортної мережі було виконано її відображення на часову мережу Петрі. Основною причиною вибору саме цього математичного апарату стала необхідність опису системи як дискретно-подієвого процесу з паралельним виконанням операцій. У транспортній мережі одночасно можуть рухатись десятки поїздів, а процеси прибуття, очікування, перевантаження та відправлення відбуваються асинхронно. Класичні методи графового аналізу або статичні транспортні моделі не дозволяють коректно описати таку поведінку системи в часі. Часові мережі Петрі, навпаки, природно поєднують топологічну структуру мережі з часовою динамікою процесів.

При побудові мережі Петрі кожна вузлова станція транспортної мережі була представлена переходом. Таке відображення має важливий фізичний зміст. Перехід у мережі Петрі відповідає певній події або операції, а у транспортній системі

ключовою подією є процес перевантаження контейнерів та відправлення поїздів у нові рейси. Саме тому вузлова станція інтерпретувалась не як пасивний елемент інфраструктури, а як активний процес синхронізації транспортних потоків. Кожному переходу було призначено часову затримку, що відповідає тривалості виконання вантажних операцій на станції. Після завершення цієї затримки перехід спрацьовує, а поїзди відправляються на суміжні маршрути.

Маршрути між станціями були представлені позиціями мережі Петрі. Для кожного фізичного сегмента транспортної мережі створювались дві окремі позиції: одна відповідала руху поїзда в прямому напрямку, інша – у зворотному. Такий підхід був принципово необхідним для опису маятникового руху. Якщо у класичних логістичних моделях маршрут часто розглядається як симетричний зв'язок між двома вузлами, то у даному випадку напрямок руху має самостійне значення, оскільки поїзд у кожний момент часу може знаходитись лише в одному конкретному стані: або рухатись від станції (S_i) до (S_j), або у протилежному напрямку. Тому кожен сегмент мережі породжував пару позицій виду p_{ij} ; p_{ji} де токен у позиції (p_{ij}) означає, що поїзд перебуває в русі від станції (i) до станції (j).

Між переходами та позиціями формувались орієнтовані дуги, які описували можливі переміщення токенів у системі. Після спрацювання переходу, що відповідає станції, токени переміщувались у позиції, пов'язані з вихідними маршрутами. Це означало відправлення поїздів у рейси. Після завершення часової затримки позиції токен надходив до переходу сусідньої станції, що відповідало прибуттю поїзда. Таким чином, токени у мережі Петрі безпосередньо моделювали рухомий склад, а їх переміщення відображало реальну динаміку транспортного процесу.

Важливою особливістю побудованої моделі стала відсутність тупикових станів. Навіть термінальні вузли мережі не розглядались як кінцеві точки маршруту, оскільки концепція маятникового руху передбачає безперервну циркуляцію поїздів. Після прибуття до крайньої станції поїзд, після завершення перевантаження, автоматично відправляється у зворотному напрямку. Саме тому кожен сегмент

транспортної мережі був представлений двома взаємозв'язаними позиціями, а структура мережі Петрі залишалась циклічною навіть для периферійних вузлів.

Під час формування мережі особлива увага приділялась просторовому розташуванню елементів. Координати переходів у мережі Петрі безпосередньо успадковувались із координат вершин транспортного графа. Це дозволило зберегти геометричну структуру вихідної транспортної мережі та забезпечити наочність моделі. Позиції, що відповідали руху поїздів, розташовувались між відповідними станціями зі зміщенням відносно осі маршруту. Завдяки цьому вдалося уникнути накладання елементів і одночасно візуально відобразити двонаправлений характер руху.

Для автоматизації побудови мережі було розроблено програмний алгоритм у середовищі MATLAB. Вихідними даними слугували координати станцій та список ребер транспортного графа. Програма автоматично створювала переходи для кожної станції, генерувала пари позицій для кожного маршруту та будувала орієнтовані дуги між ними. Крім того, для кожного сегмента обчислювалась його геометрична довжина, яка в подальшому могла використовуватись як часова затримка позиції. Такий підхід дозволив повністю автоматизувати побудову мережі Петрі навіть для транспортних систем великої розмірності.

У результаті побудована часова мережа Петрі стала не лише графічним представленням транспортної системи, а повноцінною динамічною моделлю, здатною відтворювати процес циркуляції поїздів у мережі. На відміну від звичайного транспортного графа, який описує лише топологічні зв'язки між станціями, мережа Петрі дозволяє моделювати часову поведінку системи, синхронізацію перевантажень, очікування поїздів та формування усталеного графіка руху. Саме ця властивість робить її придатною для використання як обчислювального ядра цифрового двійника транспортної системи.

Фактично побудована модель є переходом від статичного опису мережі до моделі самосинхронізованої транспортної системи. Граф визначає лише структуру можливих зв'язків, тоді як часова мережа Петрі описує реальну динаміку взаємодії транспортних потоків. Це дозволяє досліджувати не тільки маршрути руху, але й

закономірності формування усталеного режиму, вплив окремих вузлів на функціонування всієї системи, а також реакцію мережі на зміну параметрів експлуатації.

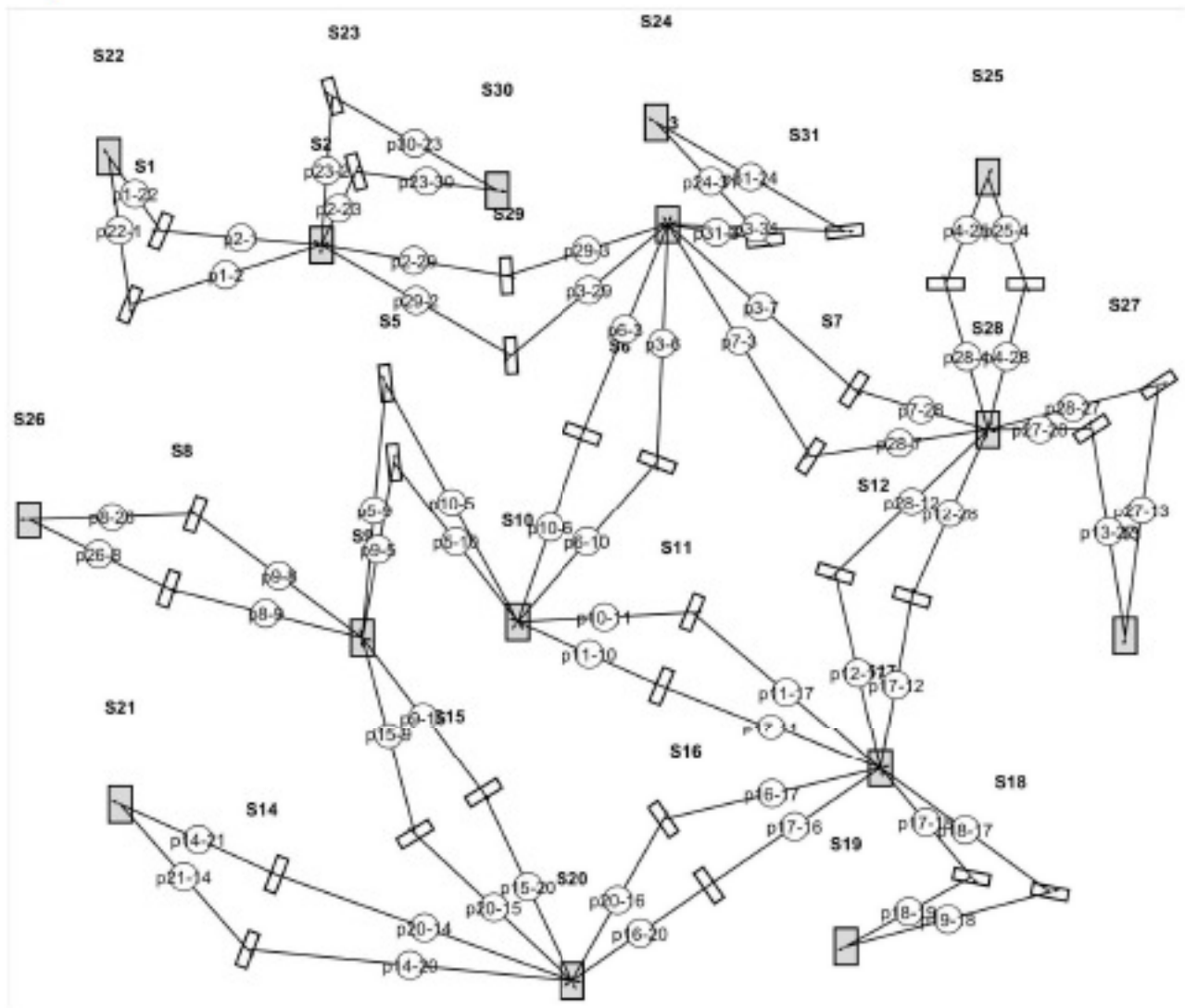


Рисунок 6.1 – Часова мережа Петрі, що моделює оптимальний усталений режим роботи експрес-логістичної мережі доставки контейнерів

Побудована часова мережа Петрі являє собою формалізовану модель функціонування транспортної системи маятникових контейнерних перевезень, у межах якої відображаються як топологічна структура мережі, так і часові закономірності взаємодії між окремими вузлами. На відміну від традиційних транспортних схем, де графічне представлення обмежується лише відображенням станцій та маршрутів, дана модель описує безпосередньо процес функціонування

системи у часі. У мережі одночасно моделюються рух поїздів, процеси перевантаження контейнерів, очікування прибуття суміжних складів та циклічне формування транспортних потоків. У результаті створена модель дозволяє досліджувати не тільки структуру транспортної мережі, але і закономірності її динамічної поведінки.

Оснoву мережі складають переходи, які відповідають вузловим станціям транспортної системи. Кожний перехід відображає процес обробки контейнеропотоку у вузлі та виконує функцію синхронізації суміжних маршрутів. У фізичному сенсі спрацювання переходу відповідає завершенню технологічних операцій на станції та відправленню поїздів у нові рейси. Таким чином, вузол мережі розглядається не як статичний елемент інфраструктури, а як активний центр перерозподілу транспортних потоків. Це дозволяє моделювати взаємодію між різними напрямками перевезень і враховувати вплив кожної станції на загальний режим роботи транспортної системи.

Позиції мережі Петрі відповідають процесу руху поїздів між станціями. Кожна позиція моделює окремий напрямок руху, а токени, що знаходяться у позиціях, інтерпретуються як поїзди, які виконують перевезення контейнерів по відповідних маршрутах. Такий підхід дозволяє описувати транспортний процес як безперервну циркуляцію рухомого складу між вузлами мережі. Поїзд не зникає після завершення маршруту і не завершує свій цикл у термінальній точці, а продовжує рух у зворотному напрямку після виконання перевантаження. Завдяки цьому транспортна система набуває циклічного характеру, а вся мережа функціонує як замкнений динамічний механізм.

Особливістю побудованої моделі є двонаправлене представлення кожного транспортного сегмента. Для кожного маршруту між станціями створювались окремі позиції для прямого та зворотного руху. Це дозволило коректно описати маятниковий характер перевезень і забезпечити незалежний облік потоків у різних напрямках. Така структура особливо важлива для моделювання систем крос-докінгу, де часові параметри руху мають критичне значення для синхронізації процесів перевантаження контейнерів.

У процесі функціонування мережі токени безперервно переміщуються між позиціями та переходами, формуючи складну систему взаємопов'язаних транспортних циклів. Після прибуття поїзда до вузлової станції токен переходить до відповідного переходу, де очікує завершення умов синхронізації. Лише після прибуття всіх необхідних поїздів виконується спрацювання переходу, а система переходить до наступного етапу транспортного циклу. Таким чином, мережа автоматично забезпечує координацію руху без необхідності централізованого диспетчерського управління.

Важливою властивістю побудованої мережі є її здатність формувати усталений режим функціонування. У процесі моделювання система поступово переходить від початкового неузгодженого стану до циклічного режиму, у якому всі транспортні операції повторюються через певний часовий інтервал. Це означає, що графік руху виникає безпосередньо як результат взаємодії елементів мережі, а не задається зовнішнім чином. Фактично мережа Петрі виконує не лише функцію моделювання, але й функцію автоматичного пошуку узгодженого транспортного режиму.

Отримана модель дозволяє досліджувати вплив окремих вузлів на роботу всієї транспортної системи. У процесі аналізу було встановлено, що частина станцій виконує роль центрів синхронізації, через які проходить значна кількість транспортних циклів. Саме ці вузли найбільшою мірою визначають часову структуру функціонування мережі. Зміна параметрів таких станцій або суміжних маршрутів призводить до перебудови графіка руху у масштабах усієї системи.

Крім того, побудована мережа Петрі дозволяє аналізувати стійкість транспортного процесу до змін параметрів експлуатації. При зміні часу руху по окремих сегментах або тривалості перевантаження система автоматично адаптується до нових умов та переходить до нового узгодженого режиму. Це дозволяє розглядати модель як основу для створення адаптивного цифрового двійника транспортної мережі, здатного оперативно реагувати на зміни стану інфраструктури або транспортних потоків.

У візуальному аспекті побудована мережа зберігає просторову структуру вихідного транспортного графа. Координати переходів відповідають реальному розташуванню станцій, а позиції, що описують маршрути руху, розміщені між ними відповідно до напрямків перевезень. Завдяки цьому модель поєднує формальну математичну структуру з наочним графічним представленням транспортної системи. Це особливо важливо при аналізі великих мереж, де необхідно одночасно оцінювати як топологію маршрутів, так і часову динаміку транспортного процесу.

У цілому побудована часова мережа Петрі являє собою складну багаторівневу модель транспортної системи, яка поєднує елементи теорії графів, дискретно-подієвого моделювання та синхронізації транспортних потоків. На відміну від традиційних статичних моделей транспортної мережі, вона дозволяє відображати реальну динаміку роботи системи та досліджувати закономірності формування узгодженого графіка руху маятникових контейнерних поїздів у мережі з крос-докінгом.

6.4 Розрахунок сталого режиму роботи мережі і побудова ГРП

Після побудови часової мережі Петрі наступним етапом дослідження стало використання цієї моделі для формування узгодженого графіка руху маятникових контейнерних поїздів у мережі з крос-докінгом. На відміну від класичних підходів до побудови розкладів, де часові параметри задаються диспетчером або визначаються шляхом розв'язання задач математичного програмування, у даному випадку графік руху виникав безпосередньо як результат функціонування самої мережі Петрі. Фактично транспортна система не отримувала готовий розклад наперед, а самостійно формувала його у процесі динамічної взаємодії між усіма вузлами та маршрутами.

Основна ідея такого підходу полягала у тому, що кожен поїзд у мережі розглядався не як окремий незалежний об'єкт, а як частина єдиної синхронізованої

системи контейнерних перевезень. У звичайних транспортних моделях графік руху часто формується локально для окремих маршрутів або напрямків. У результаті виникають ситуації, коли поїзди прибувають до вузлових станцій у різний час, що призводить до простоїв, накопичення контейнерів та порушення технології крос-докінгу. Для мережі маятникових перевезень така ситуація є критичною, оскільки ефективність системи безпосередньо залежить від можливості одночасного прибуття суміжних поїздів до вузлових станцій та швидкого виконання перевантаження.

Саме тому в побудованій часовій мережі Петрі була реалізована логіка синхронізації. Перехід, що відповідає вузловій станції, міг спрацювати лише за умови прибуття всіх необхідних поїздів. У фізичному сенсі це означало, що вантажні операції починаються лише тоді, коли на станції зібрались усі потоки контейнерів, необхідні для подальшого перерозподілу. Після завершення перевантаження поїзди одночасно відправлялись у нові рейси, а процес повторювався циклічно. Таким чином, система поступово переходила від випадкового початкового стану до впорядкованого синхронізованого режиму роботи.

Моделювання виконувалось у середовищі MATLAB за допомогою подієвої симуляції часової мережі Петрі. У процесі роботи моделі відслідковувались моменти прибуття поїздів до станцій, тривалість виконання перевантажень, час відправлення та подальшого руху по маршрутах. Кожне спрацювання переходу породжувало нові події, а вся система функціонувала як складний дискретно-подієвий механізм із великою кількістю взаємозалежних циклів.

На початкових етапах симуляції поведінка системи мала перехідний характер. Через довільний розподіл поїздів по маршрутах моменти прибуття на вузлові станції не були узгодженими, тому окремі поїзди змушені були очікувати завершення інших операцій. Однак у процесі циркуляції система починала поступово синхронізуватись. Часові зсуви між окремими маршрутами вирівнювались, а інтервали між повторними перевантаженнями ставали дедалі стабільнішими. Після

певного числа циклів мережа переходила до усталеного режиму, у якому вся структура руху починала точно повторюватись через фіксований період часу.

Отриманий графік руху (рис. 6.2) фактично став проявом самоорганізації транспортної системи.

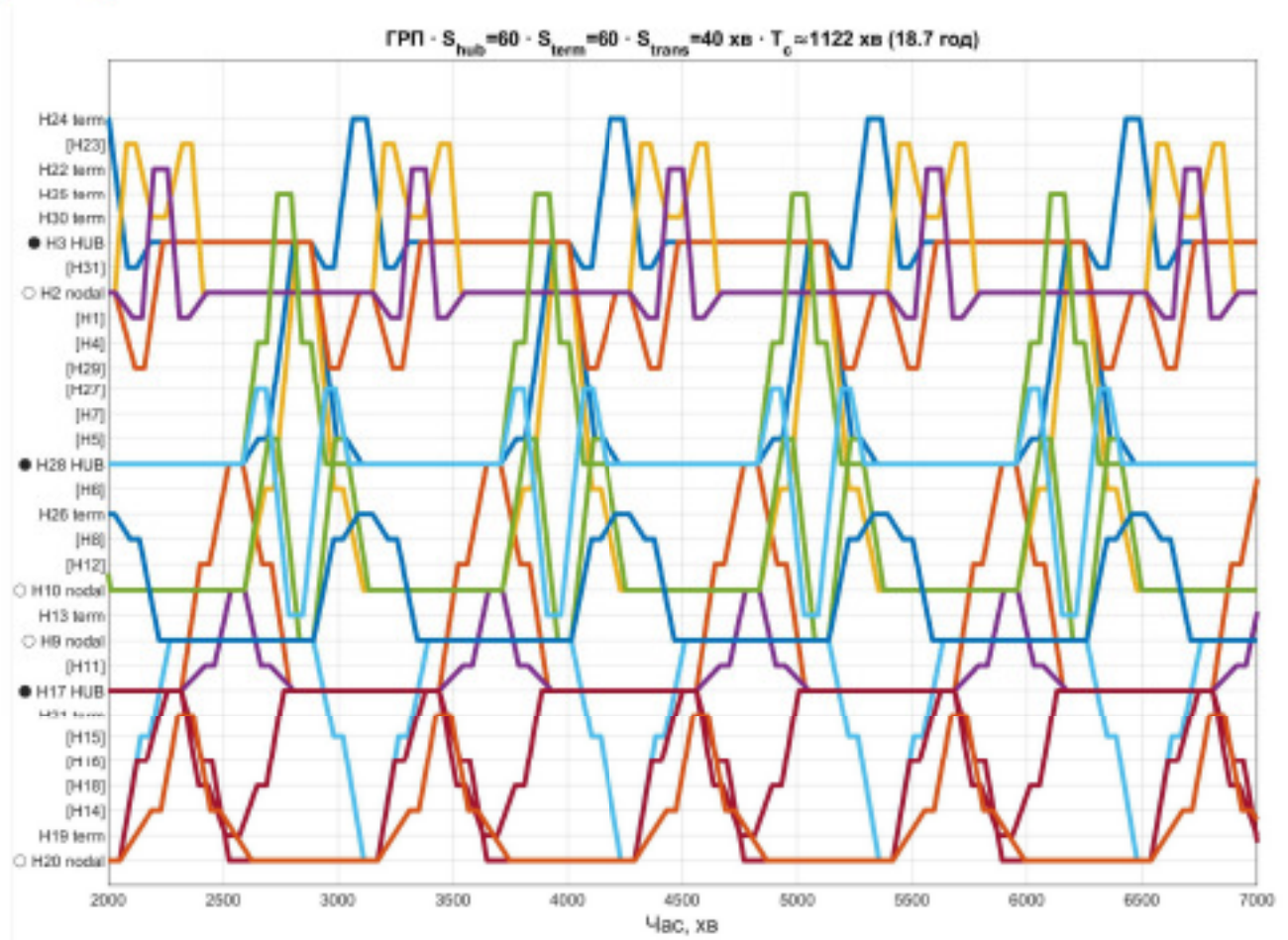


Рисунок 6.2 – Циклічний графік руху поїздів експрес-логістичної мережі доставки контейнерів, отриманий в ході моделювання

На відміну від традиційних диспетчерських технологій, де розклад задається зверху як жорстке правило, у даному випадку він виникав природним чином внаслідок взаємодії всіх елементів мережі. Це є однією з ключових особливостей застосування часових мереж Петрі до задач транспортного планування. Мережа не просто моделює виконання наперед заданого графіка, а самостійно знаходить режим, у якому система здатна функціонувати без конфліктів та порушень синхронізації.

Особливо важливим результатом стало те, що отриманий режим виявився стійким та незалежним від початкового стану системи. Незалежно від того, у яких позиціях перебували поїзди на початку моделювання, після завершення перехідного процесу мережа приходила до одного й того самого циклічного графіка руху. Це означає, що система має властивість самосинхронізації та автоматично компенсує початкові часові відхилення. Для транспортних систем така властивість є надзвичайно важливою, оскільки в реальних умовах експлуатації практично неможливо забезпечити ідеальне дотримання початкового графіка.

Побудований розклад продемонстрував, що навіть складна мережа з великою кількістю маршрутів може функціонувати як єдиний узгоджений механізм. У процесі симуляції було видно, що окремі вузлові станції починають працювати у власних фазах, але всі ці фази залишаються стабільно пов'язаними між собою. У результаті формується циклічна структура перевезень, у якій кожен поїзд періодично повторює свій маршрут, а моменти перевантаження контейнерів синхронізуються в масштабах усієї мережі.

Графік руху, отриманий у результаті симуляції, також дозволив дослідити внутрішню структуру транспортних потоків. Виявилось, що окремі вузли мережі виконують роль центрів синхронізації, через які проходить значна кількість циклів. Саме в цих точках формуються основні ритми функціонування всієї системи. При зміні параметрів таких вузлів або пов'язаних із ними маршрутів перебудовується не лише локальний фрагмент графіка, а й часовий режим усієї транспортної мережі.

Важливою особливістю побудованої моделі стала її здатність автоматично адаптуватись до зміни умов експлуатації. При зміні тривалості руху на окремих маршрутах або часу виконання перевантаження система не руйнувалась і не потребувала ручного перепланування. Після оновлення параметрів мережа Петрі автоматично переходила до нового усталеного режиму та формувала новий узгоджений графік руху. Фактично транспортна система самостійно перебудовувала власну часову структуру відповідно до нових умов.

У контексті цифрової трансформації транспортної галузі це має принципове значення. Традиційні графіки руху є статичними та потребують складного ручного

коригування при будь-яких змінах інфраструктури або режиму роботи. Запропонований підхід дозволяє перейти до динамічних самоналаштовуваних транспортних систем, у яких графік руху не фіксується жорстко, а постійно підтримується самою мережею через механізми синхронізації.

Отримані результати показали, що часова мережа Петрі може використовуватись не лише як інструмент візуалізації транспортного процесу, але і як повноцінне обчислювальне ядро цифрового двійника транспортної системи. Модель дозволяє одночасно відображати структуру мережі, динаміку руху поїздів, процеси перевантаження контейнерів та формування усталеного графіка руху. При цьому система здатна автоматично реагувати на зміни параметрів та підтримувати узгоджений режим функціонування без втручання диспетчера. Саме ця властивість робить запропонований підхід перспективним для побудови адаптивних транспортних систем нового покоління.

Для знаходження розкладу застосовано метод симуляції за чергою подій (*event-driven simulation*). Стан системи змінюється в моменти прибуття поїздів до вузлових станцій. Ключовою особливістю моделі є умова спрацювання переходу: перевантаження починається лише тоді, коли всі вхідні позиції містять токени, що гарантує повну синхронізацію поїздів у вузлі (принцип крос-докінгу).

У процесі моделювання система проходить через перехідний період, після чого стабілізується в усталеному режимі. Параметри цього режиму визначаються наступним чином: мінімальний період курсування (T_c): обчислюється як середнє значення інтервалів між послідовними моментами відправлення поїздів зі станцій у фазі стабілізації.

Таким чином, експериментальне моделювання підтверджує гіпотезу про єдиність усталеного режиму для даної топології. Незалежно від початкового розташування поїздів на маршрутах, система шляхом самосинхронізації виходить на ідентичний період T_c та структуру графіка руху.

Фізична коректність побудованого графіка верифікується через систему різницевих обмежень:

$$\begin{cases} (\phi_j - \phi_i) \bmod T_c \geq t_{ij} \\ (\phi_i - \phi_j) \bmod T_c \geq t_{ji} \end{cases} \quad (6.1)$$

де величини ϕ_i, ϕ_j описують фази роботи вузлів транспортної мережі, тобто моменти часу всередині загального циклу функціонування системи T_c , у які на відповідних станціях починається процес синхронізованого перевантаження контейнерів та відправлення поїздів. Таким чином вектор фаз ϕ визначає часове зміщення моментів перевантаження на кожній станції відносно опорного вузла (наприклад, хаба №3).

Фактично кожна станція у мережі має власне положення у межах циклічного графіка руху. Якщо вся система працює періодично з циклом T_c , то події на різних станціях відбуваються не одночасно, а зі сталими часовими зсувами одна відносно одної. Саме ці часові зсуви і визначаються фазами ϕ_i .

Це гарантує, що розклад є реалізованим, і жоден поїзд не потребує одночасного перебування у двох різних точках мережі.

Таким чином – використання мереж Петрі замість класичного імітаційного моделювання забезпечує високу швидкість перерахунку графіка. При зміні параметрів інфраструктури (наприклад, збільшенні часу ходу через ремонтні роботи на сегменті) система автоматично генерує новий оптимальний розклад без втручання диспетчера. Це робить запропонований метод ефективним інструментом підтримки прийняття рішень у режимі реального часу в складі цифрового двійника залізничної мережі.

7 Економічне обґрунтування створення мережі швидкісної контейнерної доставки

7.1 Розрахунок дохідної частини проекту

Впровадження мережі швидкісної доставки контейнерів на базі спеціалізованого рухомого складу та мережі автоматизованих терміналів розглядається як стратегічний інвестиційний проект, спрямований на залучення 20% ринку автомобільних контейнерних перевезень. На відміну від традиційних методів, запропонована технологія дозволяє мінімізувати час на перевантажувальні операції та очікування, що робить залізничний транспорт конкурентоспроможним на плечі доставки як на відстані 450 км і більше, так і на менші відстані.

Економічний результат (валовий дохід) від експлуатації мережі формується за рахунок тарифної виручки від перевезення цільового обсягу контейнерів $Q_{project}$.

Згідно з ринковими оцінками на 2025-2026 роки, загальний обсяг контейнерних перевезень автотранспортом в Україні становить приблизно $Q_{auto}=230$ тис. TEU на рік. Проект передбачає залучення п'ятої частини цього ринку, що складає:

$$Q_{project} = 230000 \cdot 0.2 = 46000 \text{ TEU/рік}.$$

Розрахунок базового річного результату O_{base} виконується за формулою:

$$O_{base} = Q_{auto} \cdot k_{market} \cdot L_{avg} \cdot T_{USD} \cdot E_{rate}, \quad (7.1)$$

де: Q_{auto} – загальний обсяг ринку автоперевезень (230 тис. TEU);

k_{market} – частка ринку, що прогнозується до залучення (0,2);

L_{avg} – середня відстань доставки (450 км);

T_{USD} – базовий тариф (0,70 USD за TEU-км);

E_{rate} – прогнозний курс валют (45 UAH/USD).

Перехід на залізничну модель дозволяє не лише обійти екологічні обмеження, притаманні автотранспорту, а й суттєво знизити логістичні витрати за рахунок низьких тарифів української залізничної системи. Зокрема, тариф на транзитне переміщення одного TEU залізничними шляхами України на 1 км становить 0,7 USD, що є конкурентною перевагою у порівнянні з іншими країнами регіону та автомобільними перевізниками.

Таким чином базовий річний результат становитиме:

$$O_{base} = 230000 \cdot 0.2 \cdot 450 \cdot 0.7 \cdot 45 = 652.05 \text{ млн грн.}$$

Для врахування динаміки ринку в моделі закладено щорічну індексацію тарифу на рівні 8%, що дозволяє компенсувати інфляційні ризики та зміну вартості енергоносіїв. Запропоновані заходи передбачають створення розгалуженої мережі швидкісних контейнерних поїздів на базі існуючої залізничної інфраструктури України. Основною метою проекту є переорієнтація 20% обсягів контейнерних перевезень, які наразі виконуються автомобільним транспортом, на залізничний сегмент.

7.2 Оцінка витрат та інвестицій

Для функціонування мережі необхідно облаштувати термінали швидкого перевантаження.

- Капітальні витрати: вартість одного термінала залежить від кількості блоків, що дозволяє виконувати операції паралельно. Для мережі Укрзалізниці, включаючи вузлові станції та порти, необхідно облаштувати відповідну кількість терміналів.

- Поточні витрати: загальні експлуатаційні витрати.

Капітальні витрати (CAPEX) проекту включають придбання 16 одиниць рухомого складу та облаштування 7 терміналів. Загальна сума початкових інвестицій розраховується як:

$$K = (n_{tr} \cdot P_{tr} + n_{term} \cdot P_{term}) \cdot E_{rate}, \quad (7.2)$$

де $n_{tr} \cdot P_{tr}$ – вартість одиниці рухомого складу (2 млн USD) та термінала (1,5 млн USD) відповідно.

Таким чином капітальні витрати становитимуть:

$$K = (16 \cdot 2000000 + 7 \cdot 1500000) \cdot 45 = 1912.5 \text{ млн грн}$$

Поточні операційні витрати (OPEX) прийняті на рівні 10% від загальної вартості капітальних вкладень. Цей показник включає витрати на енергоносії, технічне обслуговування, фонд оплати праці персоналу та амортизаційні відрахування.

7.3 Визначення інтегрального економічного ефекту

Для оцінки ефективності проекту використовується метод дисконтування грошових потоків. Коефіцієнт дисконтування α_t враховує ставку дисконту (12%),

очікувану інфляцію (7,5%) та премію за ризик (1%):

$$\alpha_t = \frac{1}{[(1+E)(1+I+R)]^{t-t_p}}, \quad (7.3)$$

Коефіцієнт приведенного економічного ефекту на наступні 10 років становитиме:

$$\alpha_{2026} = \frac{1}{(1+0.12)(1+0.075+0.01)^0} = 1.0000$$

$$\alpha_{2027} = \frac{1}{(1+0.12)(1+0.075+0.01)^1} = 0.8229$$

$$\alpha_{2028} = \frac{1}{(1+0.12)(1+0.075+0.01)^2} = 0.6772$$

$$\alpha_{2029} = \frac{1}{(1+0.12)(1+0.075+0.01)^3} = 0.5573$$

$$\alpha_{2030} = \frac{1}{(1+0.12)(1+0.075+0.01)^4} = 0.4586$$

$$\alpha_{2031} = \frac{1}{(1+0.12)(1+0.075+0.01)^5} = 0.3774$$

$$\alpha_{2032} = \frac{1}{(1+0.12)(1+0.075+0.01)^6} = 0.3105$$

$$\alpha_{2033} = \frac{1}{(1+0.12)(1+0.075+0.01)^7} = 0.2555$$

$$\alpha_{2034} = \frac{1}{(1+0.12)(1+0.075+0.01)^8} = 0.2103$$

$$\alpha_{2035} = \frac{1}{(1+0.12)(1+0.075+0.01)^9} = 0.1730$$

Чистий дисконтований дохід (NPV) визначається як різниця між накопиченими дисконтованими результатами та витратами за 10-річний період. Результати розрахунків зведені у таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Динаміка економічних показників проекту.

Показник	Роки									
	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Капітальні витрати (CAPEX), млн грн	1912.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Економічний результат (номінал), млн грн	652.05	704.21	760.55	821.4	887.11	958.08	1034.72	1117.5	1206.9	1303.45
Поточні витрати (OPEX), млн грн	191.25	205.59	221.01	237.59	255.41	274.56	295.16	317.29	341.09	366.67
Економічний ефект (чистий), млн грн	-1451.7	498.62	539.54	583.81	631.7	683.51	739.56	800.21	865.81	936.78
Коефіцієнт дисконтування	1	0.82	0.68	0.56	0.46	0.38	0.31	0.26	0.21	0.17
Дисконтований ефект, млн грн	-1451.7	410.32	365.36	325.33	289.68	257.93	229.66	204.49	182.07	162.11
NPV наростаючим підсумком, млн грн	-1451.7	-1041.38	-676.02	-350.69	-61.01	196.93	426.59	631.08	813.15	975.26

На рисунку 7.1 наведено графік окупності проекту, що відображає точку перетину кумулятивних доходів та витрат.

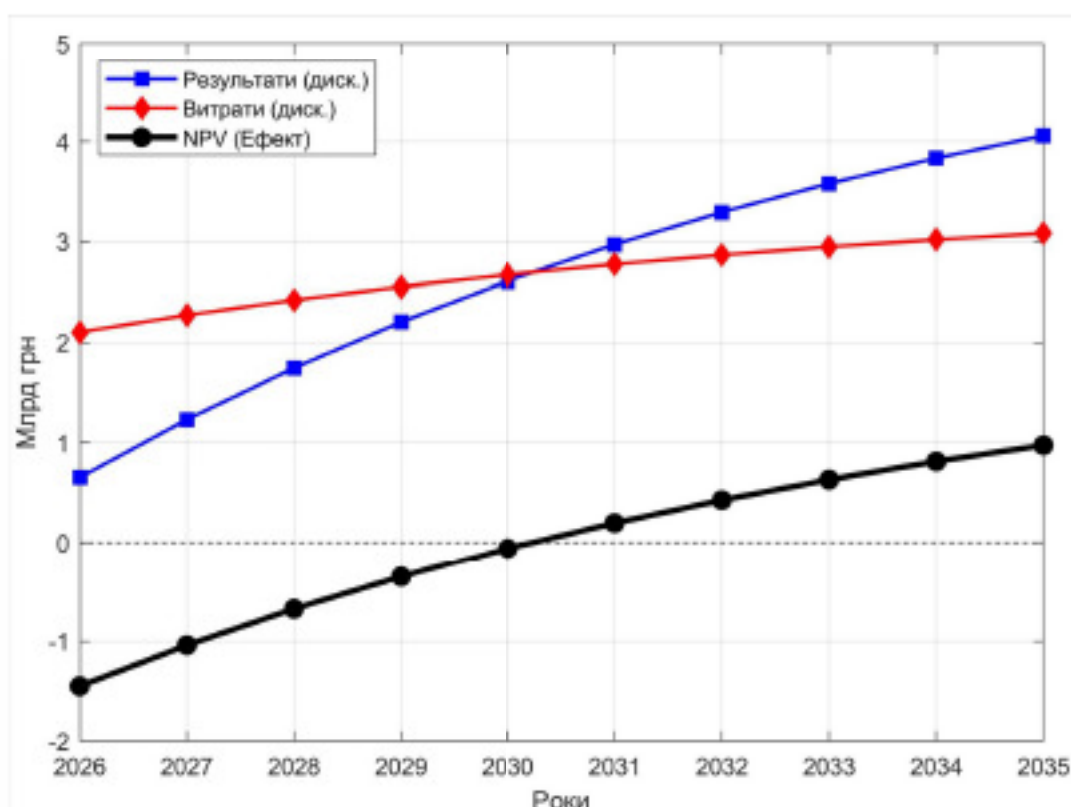


Рисунок 7.1 – Графік чистого дисконтованого доходу (NPV) мережі швидкої доставки

Аналіз отриманих даних свідчить, що за рахунок високої питомої ваги валової виручки та переходу на повний тарифний дохід, проект демонструє стійку окупність (орієнтовно на 3–4 рік експлуатації), що підтверджує доцільність впровадження швидкісних контейнерних технологій на залізничному транспорті України.

Економічний ефект від використання запропонованої технології протягом 10 років становитиме більше 975 млн грн.

Висновки

У результаті виконаної роботи було розроблено систему залізничної доставки контейнерів, орієнтованої на підвищення конкурентоспроможності відносно автомобільного транспорту на коротких та середніх відстанях.

На першому етапі було сформовано математичну модель транспортної мережі у вигляді графа та виконано її багатокритеріальну оптимізацію з використанням адаптованого алгоритму NSGA-II. При цьому враховувався комплекс взаємопов'язаних критеріїв, що визначають ефективність функціонування контейнерної системи, включаючи балансування навантаження поїздів, час доставки, кількість хабів, структурну стійкість та властивості центральності вузлів. Отримана топологія мережі стала компромісною структурою, яка забезпечує баланс між ефективністю перевезень та стійкістю транспортних потоків і формує базис для подальшого динамічного моделювання.

Подальше перетворення оптимізованого графа у часову мережу Петрі дозволило перейти від статичного опису структури до формалізації процесів функціонування транспортної системи у часі. У цій моделі вузлові станції набули інтерпретації активних синхронізуючих елементів, а маршрути між ними були представлені як напрямки руху токенів, що відображають циркуляцію поїздів. Такий підхід дозволив описати транспортну систему як циклічний дискретно-подієвий

процес, у якому взаємодія всіх елементів визначається як топологічними, так і часовими обмеженнями.

Ключовим результатом стало отримання узгодженого циклічного графіка руху, який формується не шляхом зовнішнього планування, а як внутрішня властивість функціонування часової мережі Петрі. Це забезпечує самосинхронізацію транспортної системи та автоматичне узгодження моментів прибуття і відправлення поїздів, що є критично важливим для технологій крос-докінгу.

Додатково показано, що побудована модель володіє властивістю адаптивності до зміни параметрів експлуатації. При варіації часу руху або тривалості обробки система автоматично переходить до нового усталеного режиму, що дозволяє розглядати її як основу для реалізації цифрового двійника транспортної мережі з можливістю сценарного аналізу та оперативного перепланування.

Практична значущість роботи полягає у можливості використання запропонованої моделі для підтримки прийняття рішень у задачах організації контейнерних перевезень, оцінки ефективності топологічних рішень, виявлення вузьких місць та оптимізації логістичних потоків у режимі, наближеному до реального часу. Отримані результати підтверджують доцільність використання багатокритеріальної оптимізації у поєднанні з часовими мережами Петрі для побудови високоефективних транспортних систем нового покоління.

У підсумку запропонований підхід забезпечує перехід від класичного статичного проєктування транспортної мережі до інтегрованої динамічної моделі, у якій структура і часовий режим функціонування формуються як єдина система. Це створює методологічну основу для розвитку цифрових транспортних систем, здатних до самоналаштування, адаптації та автономного підтримання узгодженого режиму роботи в умовах складних багатопотокових перевезень.

Сумарний очікуваний економічний ефект за розрахунковий період, приведений до умов першого року, становить більше ніж 975 млн гривень, що об'єктивно підтверджує доцільність і раціональність запропонованого підходу.

Список використаних джерел

1. Прохоров В. М., Пархоменко Л.А., Кофанов О.В., Ребрун В.О. Формування системи залізничної доставки контейнерів на основі поєднання концепцій PSR, регулярної експрес-логістики та цифрових двійників. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. 2026. № 215. С. 302–316.
2. Rodrigue J.-P., Comtois C., Slack B. The Geography of Transport Systems. 4th ed. New York : Routledge, 2020. 440 p.
3. Macharis C., Bontekoning Y. M. Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review. *European Journal of Operational Research*. 2004. Vol. 153, No. 2. P. 400–416. DOI: 10.1016/S0377-2217(03)00161-9.
4. Bontekoning Y. M., Macharis C., Trip J. J. Is a new applied transportation research field emerging? A review of intermodal rail–truck freight transport literature. *Transportation Research Part A*. 2004. Vol. 38, No. 1. P. 1–34. DOI: 10.1016/j.tra.2003.06.001.
5. SteadieSeifi M., Dellaert N. P., Nuijten W., Van Woensel T., Raoufi R. Multimodal freight transportation planning: A literature review. *European Journal of Operational Research*. 2014. Vol. 233, No. 1. P. 1–15. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.06.055.
6. Crainic T. G. Service network design in freight transportation. *European Journal of Operational Research*. 2000. Vol. 122, No. 2. P. 272–288. DOI: 10.1016/S0377-2217(99)00233-7.
7. Niérat P. Market area of rail-truck terminals: Pertinence of the notion of the hinterland. *Transportation Research Part A*. 1997. Vol. 31, No. 6. P. 439–454. DOI: 10.1016/S0965-8564(97)00004-X.
8. Ballis A., Golias J. Comparative evaluation of existing and innovative rail-road freight transport terminals. *Transportation Research Part A*. 2002. Vol. 36, No. 7. P. 593–611. DOI: 10.1016/S0965-8564(01)00024-6.

9. Woxenius J. Generic framework for transport network designs: description and validation from a transshipment perspective. *Transportation Planning and Technology*. 2007. Vol. 30, No. 2–3. P. 175–194. DOI: 10.1080/03081060701395324.
10. Roso V., Woxenius J., Lumsden K. The dry port concept: connecting container seaports with the hinterland. *Journal of Transport Geography*. 2009. Vol. 17, No. 5. P. 338–345. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2008.10.008.
11. Arnold P., Peeters D., Thomas I. Modelling a rail/road intermodal transportation system. *Transportation Research Part E*. 2004. Vol. 40, No. 3. P. 255–270. DOI: 10.1016/j.tre.2003.08.004.
12. Monios J., Bergqvist R. Using a "virtual dry port" concept to facilitate an inland intermodal solution. *World Review of Intermodal Transportation Research*. 2010. Vol. 3, No. 3. P. 269–286. DOI: 10.1504/WRITR.2010.036673.
13. Dablan L. Goods transport in large European cities: Difficult to organize, difficult to modernize. *Transportation Research Part A*. 2007. Vol. 41, No. 3. P. 280–285. DOI: 10.1016/j.tra.2006.05.005.
14. Crainic T. G., Ricciardi N., Storchi G. Models for Evaluating and Planning City Logistics Systems. *Transportation Science*. 2009. Vol. 43, No. 4. P. 432–454. DOI: 10.1287/trsc.1090.0279.
15. Holguin-Veras J., Amaya Leal J., Sanchez-Diaz I., Browne M., Wojtowicz J. State of the Art and Practice of Urban Freight Management. *Transportation Research Part A*. 2020. Vol. 137. P. 360–382. DOI: 10.1016/j.tra.2018.10.036.
16. Bektas T., Crainic T. G., Van Woensel T. From managing urban freight to smart city logistics networks. *New Perspectives on Transport and Logistics Problems* / eds. P. Bruck et al. Cham : Springer, 2017. P. 43–71. DOI: 10.1007/978-3-319-49587-0_3.
17. Heinold A., Meisel F. Emission rates of intermodal rail/road and road-only transport chains under the European emission standards. *European Journal of Operational Research*. 2018. Vol. 268, No. 1. P. 140–158. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.01.015.
18. Holguin-Veras J., Silas M., Polimeni J., Cruz B. An Investigation on the Effectiveness of Joint Receiver–Carrier Policies to Increase Truck Traffic in the Off-Peak

Hours. *Networks and Spatial Economics*. 2008. Vol. 8, No. 4. P. 327–354. DOI: 10.1007/s11067-006-9011-1.

19. Pfoser S., Treiblmaier H., Schauer O. Critical success factors of synchromodality: Results from a case study and literature review. *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 14. P. 1463–1471. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.219.

20. Lam J. S. L., Gu Y. A market-oriented approach for intermodal network optimisation meeting cost, time and environmental requirements. *International Journal of Production Economics*. 2016. Vol. 171, No. 2. P. 266–274. DOI: 10.1016/j.ijpe.2015.09.031.

21. Flodén J., Barthel F., Sorkina E. Transport buyers choice of transport service: A literature review of empirical results. *Research in Transportation Business & Management*. 2017. Vol. 23. P. 35–45. DOI: 10.1016/j.rtbm.2017.02.002.

22. Балака Є. І., Зоріна О. І., Колесникова Н. М., Писаревський І. М. Оцінка економічної доцільності інвестицій в інноваційні проекти на транспорті : навч. посібник. Харків: УкрДАЗТ, 2005. 210 с.

АКТ

перевірки кваліфікаційної роботи магістра на наявність ознак академічного
плагіату

Відповідно до даних сервісу STRIKEPLAGIARISM праця «Підвищення конкурентоспроможності залізничних контейнерних перевезень за рахунок сучасних підходів»,

автор: Ребрун Віталій Олександрович

(ПІБ автор повністю)

містить 0,55 % текстових збігів. Ознаки академічного плагіату – відсутні.

Перевірку виконала

доцент кафедри

управління експлуатаційною роботою



Олена МАЛАХОВА

(підпис)

15.06.2026 р.