

Кафедра залізничних станцій та вузлів

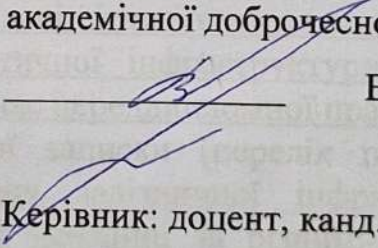
УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ
ІНФРАСТРУКТУРИ В УМОВАХ ВІЙНИ НА ОСНОВІ ПРІОРИТИЗАЦІЇ

Пояснювальна записка та розрахунки

до кваліфікаційної роботи

УПВОЗ.300.00.00.000 ПЗ

Розробив студент групи 221-ОПУТ-Д24
спеціальності 275 / 275.02 (роботу виконано
самостійно, відповідно до принципів
академічної доброчесності)


Віталій ПОГОРЕЛОВ

Керівник: доцент, канд. техн. наук

Ганна ШЕЛЕХАНЬ

Рецензент: професор, доктор техн. наук

Андрій ПРОХОРЧЕНКО

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота включає у себе 12 слайдів презентації, 105 аркушів пояснювальної записки формату А4, що включає 15 рисунків, 26 таблиць, 53 літературних джерела.

Ключові слова: ЗАЛІЗНИЧНА ІНФРАСТРУКТУРА, ВІДНОВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ, ІНДЕКС ПРІОРИТЕТНОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ, КРИТЕРІЇ ВИБОРУ, ПРОПУСКНА СПРОМОЖНІСТЬ, ВАНТАЖОПОТОКИ.

Об'єкт дослідження у роботі — система залізничної інфраструктури АТ «Укрзалізниця». Предмет дослідження — методи та інструменти обґрунтування пріоритетів відновлення пошкоджених об'єктів залізничної інфраструктури в умовах війни.

Мета роботи — удосконалення підходів до визначення пріоритетності відновлення об'єктів залізничної інфраструктури на основі системи критеріїв стратегічної та технологічної важливості.

У роботі проаналізовано сучасний стан управління відновленням залізничної інфраструктури та фактичний стан пошкоджень.

Для вирішення задачі відновлення залізничних об'єктів в умовах війни було розроблено систему з п'яти критеріїв їх пріоритизації: вантажопотік, стратегічне значення, вартість, час та ризик повторного пошкодження. Запропонована ознака класифікації об'єктів інфраструктури за зоною досяжності для відновлення. Для забезпечення практичної реалізації методології застосовано метод аналізу ієрархій, проведена оцінка за реальними об'єктами залізничної інфраструктури.

Сформована задача оптимізації відновлення об'єктів залізничної інфраструктури для вибору оптимальної множини об'єктів залізниці для першочергового відновлення на основі сумарного часу їх відновлення.

Техніко-економічні розрахунки на одному з відновлених об'єктів показали, що комплексне застосування пріоритизації у процесі вибору об'єктів залізничної інфраструктури забезпечує економічний ефект у понад 81 млн грн за 5 років життєвого циклу проекту.

ABSTRACT

This qualification work includes 12 presentation slides, 105 sheets of explanatory notes in A4 format, including 15 figures, 26 tables, 53 literary references.

Keywords: RAILWAY INFRASTRUCTURE, INFRASTRUCTURE FACILITY RESTORATION, RESTORATION PRIORITY INDEX, SELECTION CRITERIA, CAPACITY, FREIGHT FLOWS.

The object of the study is the railway infrastructure system of Ukrzaliznytsia. The subject of the study comprises methods and tools for substantiating the priorities for restoring damaged railway infrastructure facilities under wartime conditions.

The purpose of the study is to improve the process of railway infrastructure restoration under wartime conditions through prioritization.

The work analyzes the current state of railway infrastructure restoration management and the actual extent of infrastructure damage.

To address the problem of restoring railway facilities under wartime conditions, a system of five prioritization criteria was developed: freight flow, strategic importance, cost, restoration time, and the risk of repeated damage. A classification feature for infrastructure facilities based on restoration accessibility zones was proposed. To ensure the practical implementation of the methodology, the Analytic Hierarchy Process (AHP) was applied, and an evaluation was conducted using real railway infrastructure facilities.

An optimization problem for railway infrastructure restoration was formulated to determine the optimal set of railway facilities for priority restoration based on the total restoration time.

Technical and economic calculations for one of the restored facilities demonstrated that the integrated application of prioritization in the selection process of railway infrastructure facilities provides an economic benefit exceeding UAH 81 million over a five-year project life cycle.

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет управління процесами перевезень

Кафедра залізничних станцій та вузлів

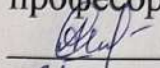
Освітній рівень: магістр

Спеціальність 275 Транспортні технології

275.02 Транспортні технології (на залізничному транспорті)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,
професор, доктор техн. наук

 О. М. Огар

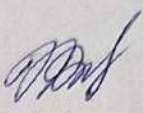
«25» лютого 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Погорелову Віталію Вадимовичу

1. Тема проекту «Удосконалення процесу відновлення об'єктів залізничної інфраструктури в умовах війни на основі пріоритизації», керівник проекту (роботи) Шелехань Ганна Ігорівна, к.т.н., доцент, затверджено розпорядженням факультету УПП від «23» лютого 2026 р. № 06/26.
2. Строк подання студентом закінченої роботи – «20» червня 2026 року.
3. Вихідні дані до проекту (роботи): дані щодо пошкоджених залізничних об'єктів за час війни, параметри цих об'єктів, обсяги залізничних вантажопотоків на стратегічних напрямках, нормативні дані вітчизняних та закордонних організацій та установ щодо відновлення критичної інфраструктури в Україні під час військових дій, інші дані, зібрані під час переддипломної практики.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Аналіз сучасного стану залізничної інфраструктури України. Класифікація пошкоджених об'єктів залізниці за різними ознаками. Розробка системи критеріїв для вибору пріоритетності відновлення об'єктів. Розробка методології застосування розробленої системи критеріїв. Формування та реалізація оптимізаційної моделі вибору об'єктів для відновлення та їх послідовності. Економічна оцінка заходів з пріоритизації відновлення інфраструктурних об'єктів.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): об'єкт, предмет, задачі дослідження, мета роботи; аналіз сучасного стану залізничної інфраструктури; класифікація об'єктів відновлення; розробка критеріїв для пріоритизації відновлення; математична постановка задачі оптимального вибору об'єктів та їх послідовності; графічна інтерпретація результатів оптимізації; економічний ефект при впровадженні заходів; висновки. Загалом 9 аркушів.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультантів	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Техніко-економічне обґрунтування ефективності заходів з відновлення інфраструктури	Гриценко Н. В., к.е.н., доцент		

7. Дата видачі завдання «25» лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1 Вступ. Аналіз сучасного стану залізничної інфраструктури України	10. 03. 2026 р.	виконано
2 Аналіз наукових джерел за тематикою роботи	20. 03. 2026 р.	виконано
3 Класифікація пошкоджених об'єктів залізниці за різними ознаками	05. 04. 2026 р.	виконано
4 Розробка системи критеріїв для вибору пріоритетності відновлення об'єктів	18. 04. 2026 р.	виконано
5 Розробка методології застосування розробленої системи критеріїв	26.04.2026 р.	виконано
6 Формування та реалізація оптимізаційної моделі вибору об'єктів для відновлення та їх послідовності	12. 05. 2026 р.	виконано
7 Економічна оцінка заходів з пріоритизації відновлення інфраструктурних об'єктів	20. 05. 2026 р.	виконано
8 Підготовка графічного матеріалу для захисту	05. 06. 2026 р.	виконано
9 Оформлення роботи	10. 06. 2026 р.	виконано

Здобувач

Віталій ПОГОРСЛОВ

Керівник роботи

Ганна ШЕЛЕХАНЬ

Зміст

Вступ	6
1 Теоретичні основи та практичні засади управління відновленням залізничної інфраструктури	8
1.1 Аналітична оцінка стану пошкоджень залізничної інфраструктури України	8
1.2 Класифікація об'єктів залізничної інфраструктури та їхня критичність для транспортних систем	16
1.3 Огляд наукової літератури з проблематики відновлення транспортної інфраструктури	19
2 Методологія пріоритизації відновлення об'єктів залізничної інфраструктури	24
2.1 Формування системи критеріїв пріоритизації	24
2.2 Формування вихідних даних для багатокритеріальної моделі	29
2.3 Реалізація багатокритеріальної моделі пріоритизації відновлення	35
2.4 Розрахунок індексу пріоритетності для пріоритизації відновлення об'єктів інфраструктури	40
2.5 Аналіз чутливості, адекватності та верифікація стійкості моделі	45
3 Оптимізаційна модель вибору об'єктів для відновлення залізничної інфраструктури	54
3.1 Постановка задачі оптимізації відновлення об'єктів залізничної інфраструктури	54
3.2 Обґрунтування підходу до рішення задачі відновлення об'єктів залізничної інфраструктури	58
3.3 Програмна реалізація оптимізаційної моделі відновлення об'єктів залізничної інфраструктури	62

					УПВОЗ.300.00.00.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Удосконалення процесу відновлення об'єктів залізничної інфраструктури в умовах війни на основі пріоритизації Лім. 1 Аркуш Аркушів 4 105 УкрДУЗТ 4		
Розроб.	Погорелов						
Перев.	Шелехань						
Н. контр.	Шаповал						
Затв.	Огар			13.06.25			

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультантів	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Техніко-економічне обґрунтування ефективності заходів з відновлення інфраструктури	Гриценко Н. В., к.е.н., доцент		

7. Дата видачі завдання «25» лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1 Вступ. Аналіз сучасного стану залізничної інфраструктури України	10. 03. 2026 р.	
2 Аналіз наукових джерел за тематикою роботи	20. 03. 2026 р.	
3 Класифікація пошкоджених об'єктів залізниці за різними ознаками	05. 04. 2026 р.	
4 Розробка системи критеріїв для вибору пріоритетності відновлення об'єктів	18. 04. 2026 р.	
5 Розробка методології застосування розробленої системи критеріїв	26.04.2026 р.	
6 Формування та реалізація оптимізаційної моделі вибору об'єктів для відновлення та їх послідовності	12. 05. 2026 р.	
7 Економічна оцінка заходів з пріоритизації відновлення інфраструктурних об'єктів	20. 05. 2026 р.	
8 Підготовка графічного матеріалу для захисту	05. 06. 2026 р.	
9 Оформлення роботи	10. 06. 2026 р.	

Здобувач _____

Віталій ПОГОРЄЛОВ

Керівник роботи _____

Ганна ШЕЛЕХАНЬ

3.4 Перевірка адекватності оптимізаційної моделі	72
4 Розрахунок економічного ефекту від заходів з відновлення об'єктів інфраструктури залізниці	76
4.1 Прогнозування розмірів вантажопотоків на ділянці	76
4.2 Розрахунок експлуатаційних витрат при впровадженні заходів з відновлення залізничних об'єктів	80
4.3 Розрахунок економічного ефекту при застосуванні заходів з відновлення інфраструктури	82
Висновки	85
Список використаних джерел	87
Додаток А Характеристика пошкоджених об'єктів залізничної інфраструктури	93
Додаток Б Структура моделі пріоритизації відновлення об'єктів залізниці	103

					УПВО3.300.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		5

Вступ

Залізничний транспорт є критичною інфраструктурою будь-якої держави, а в умовах військових дій набуває особливого стратегічного значення як основа логістичного забезпечення оборони, евакуації населення та гуманітарних вантажів. Повномасштабне вторгнення російської федерації в Україну завдає системних збитків залізничній мережі країни.

Попри значні руйнування, АТ «Укрзалізниця» продовжує функціонувати, здійснюючи як евакуацію населення і перевезення гуманітарної допомоги, так і комерційні вантажоперевезення. Оперативне відновлення пошкоджених ділянок є безперервним завданням, однак за умов обмежених ресурсів — фінансових, матеріальних, людських — постає актуальне питання першочерговості відновлення об'єктів інфраструктури.

На сьогоднішній день рішення про пріоритети відновлення приймаються переважно на основі оперативної необхідності та інтуїтивних оцінок керівництва, без застосування формалізованих методів. Це підвищує ризик нераціонального розподілу ресурсів, не забезпечує прозорості та обґрунтованості рішень перед міжнародними організаціями, які фінансують відновлення.

Сьогодні в Україні практично відсутній систематизований інструмент пріоритизації відновлення залізничних об'єктів. Недостатня розробленість методології щодо транспортної інфраструктури в умовах військових дій зумовлює пошук науково обґрунтованих та дієвих методів визначення порядку відновлення інфраструктурних елементів на основі критеріїв важливості для залізничної мережі та країни у цілому. Тому тема даної роботи є актуальною.

Мета роботи — удосконалення підходів до визначення пріоритетності відновлення об'єктів залізничної інфраструктури на основі системи критеріїв стратегічної та технологічної важливості.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

1. провести аналітичну оцінку стану пошкоджень залізничної інфраструктури України;

2. дослідити світовий науковий та практичний досвід відновлення транспортної інфраструктури в умовах конфліктів і катастроф;
3. розробити систему критеріїв оцінювання пошкоджених об'єктів інфраструктури з їх впровадженням у модель пріоритетності відновлення;
4. сформувати методологію оцінювання пошкоджених об'єктів інфраструктури за різними критеріями;
5. сформувати оптимізаційну модель вибору множини об'єктів для пріоритетного відновлення та їх послідовності;
6. реалізувати модель на вибірці з реальних пошкоджених об'єктів Укрзалізниці;
7. виконати оцінку економічної ефективності запропонованих заходів.

Об'єкт дослідження у роботі — система залізничної інфраструктури АТ «Укрзалізниця». Предмет дослідження — методи та інструменти обґрунтування пріоритетів відновлення пошкоджених об'єктів залізничної інфраструктури в умовах війни.

Наукова новизна полягає у наступному. Вперше для умов України розроблено п'ятикритеріальну модель пріоритизації відновлення залізничних об'єктів з урахуванням специфіки військових дій шляхом урахування ризику повторного пошкодження та окупованого статусу об'єктів. Розроблена оптимізаційна модель вибору множини об'єктів для їх пріоритетного відновлення дозволяє враховувати два ключові обмеження: мінімально необхідну пропускну спроможність мережі та мінімальний сумарний пріоритет стратегічного значення.

За темою роботи підготовлено та опубліковано наукову статтю у науково-технічному журналі «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» [1].

1 Теоретичні основи та практичні засади управління відновленням залізничної інфраструктури

1.1 Аналітична оцінка стану пошкоджень залізничної інфраструктури України

Залізнична мережа України є однією з найбільших у Європі: загальна протяжність головних та станційних колій становить близько 19 787 км, з яких 9928 км — електрифіковані лінії [2]. За цим показником Україна посідає п'яте місце серед країн Європи після Німеччини, Франції та Іспанії. Однак у розрахунку на одиницю площі та населення щільність залізничної мережі є значно нижчою за середньоєвропейський рівень — 33 км/1000 км² порівняно із 50–70 км/1000 км² у Польщі або Австрії.

АТ «Укрзалізниця» є вертикально інтегрованим монополістом, що суміщає функції власника інфраструктури, диспетчера руху та основного перевізника. Компанія має шість регіональних філій — Львівську, Одеську, Придніпровську, Південну, Південно-Західну та Донецьку.

До початку повномасштабного вторгнення залізничний транспорт забезпечував близько 62–66% усього вантажообігу України, виступаючи основним транспортним каналом для металургійної, гірничодобувної та аграрної галузей (табл. 1.1). У довоєнному 2021 році АТ «Укрзалізниця» перевезла 313,5 млн тонн вантажів та 153,6 млн пасажирів.

Повномасштабне вторгнення росії 24 лютого 2022 року запустило процес систематичного цілеспрямованого руйнування залізничної інфраструктури, що не припинявся протягом усього досліджуваного періоду. У 2025 році на залізничну систему припадало 90% усіх нещодавно зареєстрованих пошкоджень у транспортному секторі. За оновленими даними 2026 р., на залізничний сектор приходить 32% усіх пошкоджень транспортної інфраструктури, він залишається найбільш потерпілим її сегментом [3].

Вплив збройної агресії на обсяги вантажних перевезень Укрзалізниці був негайним та масштабним. Вже у березні 2022 р. — найкризовішому місяці —

місячний обсяг впав до ~8,3 млн тонн, порівняно із середньомісячним показником 2021 р. у 26,1 млн тонн — скорочення у 3,1 рази за один місяць [4]. Протягом квітня–грудня 2022 р. середньомісячні перевезення стабілізувались на рівні 10,5 млн тонн — тобто все ще на 61% нижче довоєнного рівня.

Таблиця 1.1 – Основні показники АТ «Укрзалізниця» у 2021–2025 рр.

Показник	2021	2022	2023	2024	2025
Вантажні перевезення, млн т	313,5	150,2	148,4	174,9	161,0
Пасажирські перевезення далекого сполучення, млн пас.	153,6	12,0	25,0	27,8	більше 28,0
Штат працівників, тис. осіб	237,0	216,0	198,0	183,6	177,8
Частка УЗ у вантажообігу країни, %	66%	66%	63%	62%	60%

За підсумками 2022 р. загальний обсяг вантажних перевезень скоротився до 150,2 млн тонн (рис. 1.1). Найбільше постраждали внутрішні перевезення: їх обсяг скоротився на 49,2%, або на 73,7 млн тонн. Такий розподіл збитків пояснюється географічно: основна виробнича база важкої промисловості — металургія, коксохімія, машинобудування — була зосереджена в Донецькій та Запорізькій областях, що потрапили під окупацію або стали зоною активних бойових дій.

Динаміка 2023–2024 рр. засвідчила поступове відновлення, зумовлене насамперед двома факторами: адаптацією маршрутної структури (переорієнтація потоків на захід та через морський коридор) і зростанням попиту на зернові перевезення. Відкриття Українського морського коридору у серпні 2023 р. дало потужний поштовх: у 2024 р. обсяг перевезень через морські переходи зріс до 97,9 млн тонн (+28,2% до 2023 р.) [5]. Однак у 2025 р. тренд відновлення

призупинився: обсяг вантажних перевезень скоротився з 175 млн тонн у 2024 р. приблизно до 161 млн тонн у 2025 р.

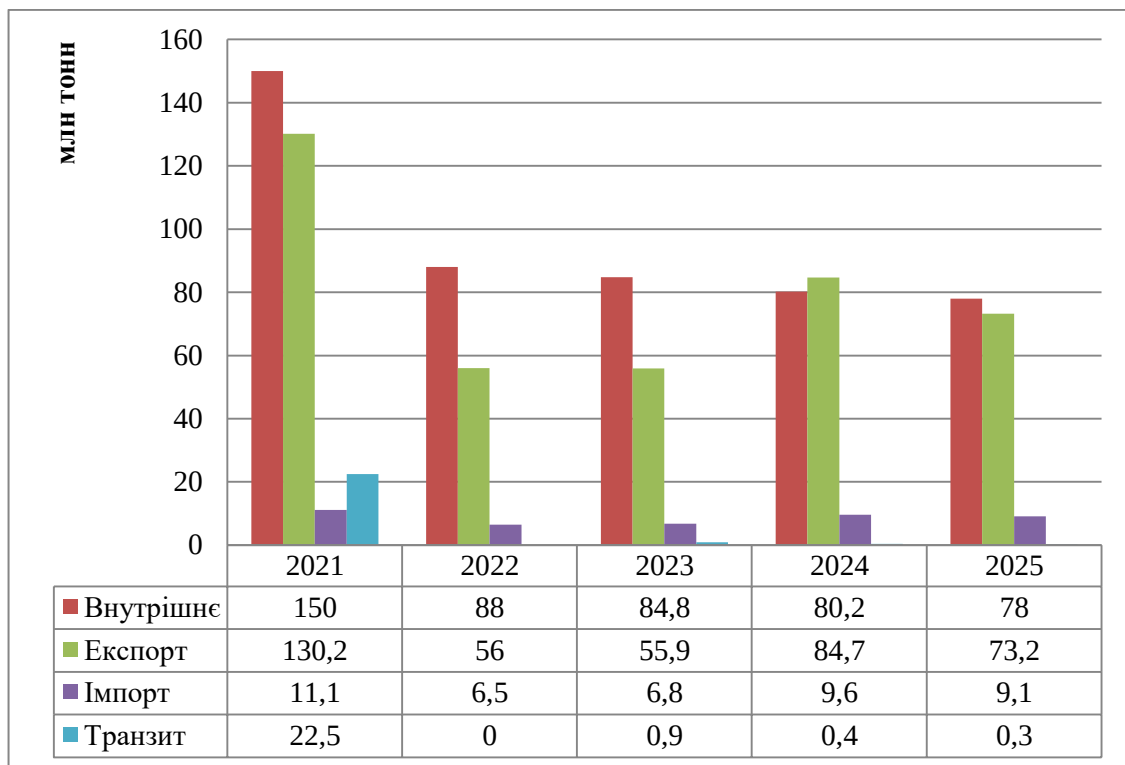


Рисунок 1.1 – Динаміка вантажних перевезень АТ «Укрзалізниця» за видами сполучення, млн тонн

Відмінною рисою залізничної мережі України є ширина колії 1520 мм — на відміну від стандарту 1435 мм, прийнятого у країнах ЄС. Ця конструктивна несумісність є постійним джерелом додаткових витрат та часових втрат на прикордонних переходах і стала одним із ключових обмежень для нарощування вантажопотоків у напрямку ЄС після 2022 року.

Структура пошкоджень за типами об'єктів (рис. 1.2) відображає стратегію противника: найбільшої шкоди завдано тим об'єктам, що формують «вузькі місця» мережі — мостовим переходам, тяговим підстанціям та прикордонним переходам. Знищення мосту або підстанції блокує рух на цілій ділянці, тоді як пошкодження рядової ділянки колії відновлюється значно швидше. Ця закономірність обґрунтовує урахування вантажопотоку як ключового критерію: чим більший потік через об'єкт, тим критичніший він для мережі і тим очевиднішою є мета для атак (табл. 1.2).

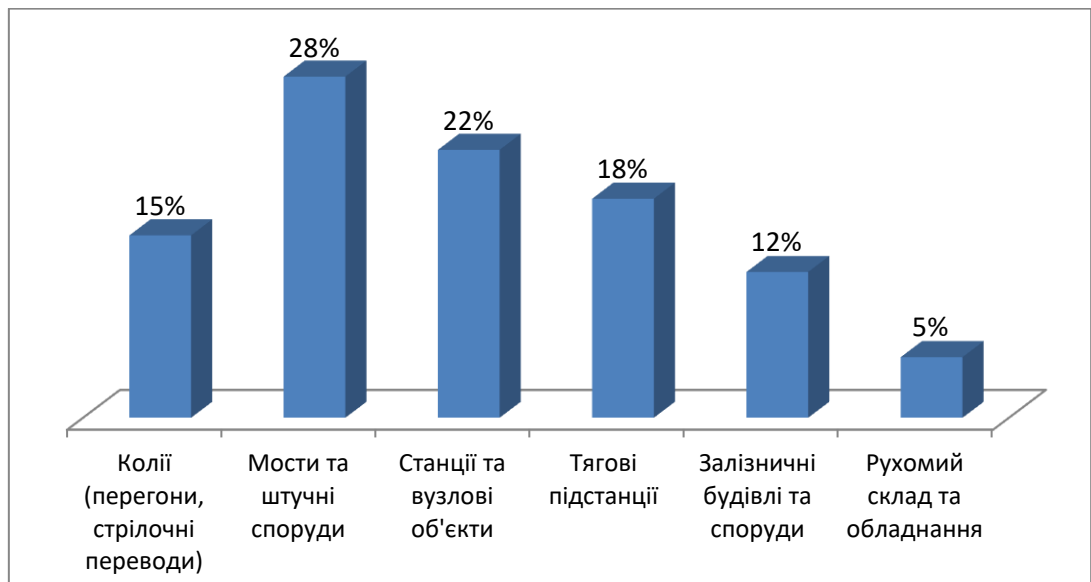


Рисунок 1.2 – Структура пошкоджень залізничної інфраструктури за типами об'єктів за 2022-2024 роки

Таблиця 1.2 – Обсяги уражених об'єктів залізничної інфраструктури

Тип об'єкта	Кількість пошкоджених / знищених об'єктів
Колія (перегони, стрілочні переводи)	більше 507 км пошкоджено/знищено
Мости та штучні споруди	понад 350 об'єктів по всій мережі
Станції та вузлові об'єкти	щонайменше 126 станцій
Тягові підстанції	значна кількість у зоні бойових дій
Залізничні будівлі та споруди	~5 500 будівель, ~4 000 споруд
Рухомий склад та обладнання	значна частина на окупованих територіях

Проведемо аналіз динаміки пошкоджень виявляє кілька характерних хвиль ескалації руйнувань. Перша хвиля — лютий–травень 2022 р. — супроводжувалась масовим знищенням об'єктів у зонах стрімкого просування або відступу: знищено переходи, мости та станції у Київській, Чернігівській та Сумській областях. Друга хвиля — осінь 2022 р.–зима 2022/23 р. — відзначалась масованими ракетними ударами по об'єктах тягового електропостачання по всій країні, що спричинило перебої з електропостачанням та зниження провізної спроможності мережі на 30–40%.

Третя хвиля — 2023–2024 рр. — характеризується тривалими систематичними ударами по вузловим об'єктам, насамперед у Харківській, Запорізькій, Херсонській та Дніпропетровській областях. У 2025 році інтенсивність ударів по залізничній інфраструктурі зростає: зафіксовані атаки на ст. Синельникове (Дніпропетровська обл.), залізничну інфраструктуру у Харківській області, що призводили до тимчасового припинення сполучення на окремих напрямках. Тільки у 2025 р. залізнична система зазнала 90% нових транспортних пошкоджень.

Незважаючи на безперервні руйнування, Укрзалізниця демонструє вражаючу організаційну стійкість: лише протягом 2024 року реконструйовано 339 км колій та відновлено 8 мостів [6]. Середній час відновлення пошкодженої ділянки колії у прифронтових регіонах становить 2–5 днів, для малих мостів — 2–4 тижні, для великих мостових переходів — місяці.

У перші місяці повномасштабного вторгнення Укрзалізниця запровадила систему аварійно-відновлювальних бригад (АВБ), що діють у постійній готовності у кожній регіональній філії. АВБ спеціалізуються на швидкому відновленні першочергової прохідності ділянки — зазвичай однопутного руху — після ударів. Середній час відновлення однопутного руху після ракетного удару по колії становить 2–5 днів, що є вражаючим показником для умов активного конфлікту [3].

Паралельно з аварійним відновленням здійснюється і планове: у 2024 р. реконструйовано 339 км колій та відновлено 8 мостів. Фінансування відновлювальних робіт здійснюється з трьох джерел: власні кошти Укрзалізниці (операційний прибуток від вантажного сегменту), кошти державного бюджету України (субвенції та цільові виділення) та міжнародна технічна допомога — гранти та пільгові кредити ЄС, США (USAID), Великобританії та міжнародних фінансових інституцій.

На основі аналізу хронології відновлення об'єктів у 2022–2024 рр. можна виявити неявні принципи, якими керувалась Укрзалізниця при визначенні черговості відновлення. Перший принцип — «оперативна необхідність»: відновлення розпочинається насамперед там, де є негайна потреба в русі поїздів

або де стоять завантажені склади. Другий принцип — «технічна простота»: об'єкти з коротшими термінами та нижчою вартістю відновлення відновлюються першочергово. Третій принцип — «донорська кон'юнктура»: об'єкти, включені до списків міжнародних програм допомоги, також набувають пріоритету незалежно від їхньої системної значущості.

Жоден із цих принципів не є формалізованим, і їх поєднання не забезпечує оптимального розподілу ресурсів. Ряд прикордонних переходів, що мають критичне значення для міжнародних перевезень, очікував відновлення довше, ніж передбачало б системне ранжування за критерієм вантажопотоку. Водночас деякі об'єкти з відносно невисоким потоком відновлювались першочергово через критичність для місцевої логістики або з міркувань безпеки.

Географічний розподіл пошкоджень залізничної інфраструктури є вкрай нерівномірним і корелює з лінією фронту та зонами окупації. Чотири регіони — Донецька, Харківська, Запорізька та Херсонська — акумулюють понад 60% загальних збитків залізничної інфраструктури [4]. Пошкодження у цих регіонах характеризуються найвищим рівнем руйнування, причому значна їх частина знаходиться на окупованих або прифронтових територіях і не підлягає відновленню у короткостроковій перспективі.

Принципово важливим є розмежування пошкоджень за ознакою можливості відновлення. У роботі запропоновано трирівневу класифікацію, що базується на просторовому положенні об'єкта відносно лінії фронту та адміністративного контролю (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Зонування пошкоджених об'єктів залізничної інфраструктури за ознакою доступності

Зона	Критерій визначення	Підходи до відновлення	Приклади регіонів / об'єктів
1	2	3	4
Зона А Підконтрольна	Об'єкт на підконтрольній Україні території, >30 км від лінії фронту	Повноцінне відновлення без обмежень; пріоритизація робіт	Львівська, Одеська, Вінницька, Закарпатська обл.

Продовження таблиці 1.3

1	2	3	4
Зона Б Прифронтowa	Об'єкт на підконтрольній Україні території, <30 км від лінії фронту або під постійним обстрілом	Відновлення можливе, але обмежене; обов'язкове врахування ризику повторного пошкодження	Частина Харківської, Запорізької, Херсонської обл.
Зона В Окупована	Об'єкт на тимчасово окупованій території	Відновлення неможливе; умовне включення в модель (фіксація стану)	Частина Донецької, Луганської, Запорізької, Херсонської обл.

За приблизними оцінками, близько 700 км залізничних колій знаходиться на тимчасово окупованих територіях [7], що унеможлиблює їх відновлення в поточних умовах. Водночас саме ці ділянки входили до складу найбільш завантажених коридорів — зокрема, маршрути в напрямку Маріуполя та Мелітополя були ключовими для металургійних підприємств Донбасу та Придніпров'я.

Аналіз просторового розміщення пошкоджених об'єктів також виявляє системний характер ударів (рис. 1.3). Цілеспрямовано атаковані об'єкти на перетині міжнародних транспортних коридорів TEN-T та основних вантажонапружених напрямків — насамперед коридорів Схід-Захід та Північ-Південь.

Основні міжнародні залізничні коридори, що перетинають Україну, мають критичне значення, оскільки об'єкти на них автоматично набувають підвищеного значення за стратегічним значенням. До таких коридорів належать: Orient/East-Med (Київ–Львів–кордон з ЄС), Baltic-Adriatic (Гданськ–Краків–Відень, вхід в Україну через Мостиська/Рава-Руська), Балтійсько-Чорноморський (Польща–Львів–Одеса–порти Чорного моря).

Особливої уваги заслуговує ситуація з прикордонними переходами. Станом на 2024 рік Україна має 14 активних залізничних прикордонних переходів з

п'ятьма країнами ЄС та Молдовою. Пропускна спроможність цих переходів суттєво обмежена технологічними причинами (зміна ширини колії) та є стратегічним «вузьким місцем» для збільшення обсягів міжнародних перевезень. Пошкодження інфраструктури переходів (наприклад, ст. Ягодин, ст. Чоп) мало б критичний вплив на всю зовнішньоторговельну логістику.



Рисунок 1.3 – Зонування території України для відновлення об'єктів залізниці

Більшість програм міжнародної фінансової підтримки висувають явні або неявні вимоги до обґрунтованості відбору об'єктів. Зокрема, Операційна політика Світового банку ОР 4.01 потребує «проведення оцінки впливу та встановлення пріоритетності проєктів на основі документованих критеріїв». Відсутність формалізованої методології пріоритизації на рівні Укрзалізниці є потенційним бар'єром для отримання частини міжнародного фінансування.

Отже, проведений аналіз сучасного стану управління відновленням залізничної інфраструктури та фактичного стану пошкоджень засвідчує, що залізнична система України, яка відіграє ключову роль у забезпеченні національної економіки та експортних потоків, зазнала системного й

цілеспрямованого руйнування, спрямованого передусім на критичні вузли мережі. Масштаб втрат підтверджує необхідність переходу від реактивного відновлення до стратегічно обґрунтованої моделі пріоритизації.

1.2 Класифікація об'єктів залізничної інфраструктури та їхня критичність для транспортних систем

Правову основу функціонування та відновлення залізничного транспорту України формує Закон України «Про залізничний транспорт», який визначає АТ «Укрзалізниця» як суб'єкта природної монополії та встановлює відносини між державою, оператором інфраструктури та перевізниками. Питання відновлення пошкодженої інфраструктури безпосередньо регулюються Законом України «Про відновлення та реконструкцію об'єктів, що постраждали від збройної агресії» (2022), яким визначено порядок фінансування відновлювальних робіт, а також повноваження та відповідальність Міністерства відновлення.

Стратегічним документом, що визначає пріоритети розвитку залізничного транспорту до 2030 року, є відповідна урядова стратегія, ухвалена розпорядженням КМУ [8]. Вона передбачає модернізацію міжнародних коридорів, впровадження ЄРСМ (Єдиного ринку залізничних послуг) та поступову стандартизацію інфраструктури відповідно до вимог ЄС. Хоча документ розроблявся до початку повномасштабного вторгнення, його цілі залишаються актуальними і формують стратегічну рамку для визначення пріоритетів відновлення.

Ключову роль у визначенні пріоритетів відновлення відіграють вимоги міжнародних партнерів, які формують умови надання фінансування. Операційна політика Світового банку вимагає документованого обґрунтування вибору проєктів для фінансування, а друга Спільна оцінка потреб відновлення України, підготовлена у 2023 році [3], зазначає необхідність «прозорого, системного та верифікованого» підходу до відбору об'єктів.

Транс'європейська транспортна мережа (TEN-T) [9] встановлює пріоритетні транспортні коридори для держав-членів та країн-кандидатів ЄС. Згідно з рішенням Ради ЄС 2022/1021, до мережі TEN-T включено низку залізничних маршрутів на території України — зокрема, коридор Orient/East-Med, що проходить через Львів, Київ та порти Чорного моря. Об'єкти, розташовані на цих коридорах, автоматично набувають підвищеного статусу у контексті стратегічного значення.

Важливим технічним аспектом є проблема ширини колії: Директива 2016/797/ЄС встановлює стандарт 1435 мм для нової інфраструктури в мережі TEN-T, а Україна використовує стандарт 1520 мм. Відповідно, при відновленні об'єктів поблизу кордонів з ЄС доцільно враховувати можливість одночасного вирішення проблеми колії, що збільшує вартість та терміни проєкту, але підвищує його стратегічну цінність у довгостроковій перспективі.

Залізнична інфраструктура являє собою складну інженерну систему взаємопов'язаних об'єктів, функціонування кожного з яких є необхідною умовою для безперервного руху поїздів. У контексті оцінювання пріоритетності відновлення базовим методологічним кроком є чітка класифікація об'єктів, яка визначає параметри їхнього порівняння та способи вимірювання критичності. Водночас аналіз наукової літератури засвідчує, що уніфікованого міжнародного стандарту такої класифікації не існує: різні автори та організації використовують відмінні підходи залежно від мети дослідження та специфіки транспорту.

Для задач технічного обслуговування та прогнозування відмов існує розроблена класифікація залізничної інфраструктури за чотирма групами [10]: колійна система (рейки, шпали, баласт, стрілочні переводи), контактнo-кабельна система (підвіска, опори, секційні роз'єднувачі), цивільні споруди (мости, тунелі, підпірні стіни) та підґрунтя (насипи, виїмки, дренаж). Ця класифікація відображає технічну перспективу, однак не враховує організаційних та управлінських аспектів, що є важливим для задачі пріоритизації відновлення.

З операційної точки зору автори роботи [11] поділяють залізничну інфраструктуру на лінійну (колії, контактна мережа) та точкову (станції, термінали, склади), наголошуючи, що точкові об'єкти — зокрема вантажні та

сортувальні станції — мають непропорційно великий вплив на ефективність усієї мережі, попри відносно невелику питому вагу у загальних активах. Аналогічний поділ на «лінійну» та «вузлову» інфраструктуру використовує і Агентство Європейського Союзу із залізниць [3] при стандартизації вимог до технічного обслуговування в мережі TEN-T.

Для умов дій принципово важливою є додаткова класифікаційна ознака, яка відсутня у більшості академічних джерел — ознака «доступності для відновлення». Так, у дослідженні [12], присвяченому відновленню транспортних мереж після катастроф, виокремлюють три категорії: об'єкти у безпечних зонах (відновлення без обмежень), об'єкти у зонах підвищеного ризику (відновлення можливе за певних умов) та об'єкти у зонах активних бойових дій (відновлення неможливе або пов'язане з неприйнятним ризиком).

У табл. 1.3 наведено класифікацію залізничних об'єктів за функціональним типом та параметрами відновлення. Терміни відновлення у таблиці є орієнтовними, у реальних умовах вони суттєво варіюються залежно від характеру пошкодження, доступності матеріалів і робочої сили, а також від пріоритетності, що надається державою конкретному об'єкту.

Таблиця 1.3 – Класифікація об'єктів залізничної інфраструктури

Клас об'єкта	Функціональний тип	Типові терміни відновлення, міс.	Вплив на мережу при відмові
Верхня будова колії	Рейки, шпали, баласт, стрілки	1–8	Блокування дільниці
Штучні споруди	Мости, тунелі, колієпроводи	3–18	Розрив коридору
Станції та вузли	Технічні, вантажні	2–14	Втрата розподільного вузла
Тягове електропостачання	Тягові підстанції, контактна мережа	1–6	Зупинка тяги на дільниці
Системи інтервального регулювання	ЕЦ, АБ, ДЦ, ГАЦ	1–5	Вимушений двосторонній рух по одній колії
Прикордонна інфраструктура	Пристрої зміни колії, митні склади	2–9	Зупинка міжнародного трафіку

Критичність об'єкта може вимірюватися різними способами. Класичний підхід теорії надійності використовує показники, що відображають, наскільки відмова конкретного компоненту знижує загальну надійність системи [13]. Для транспортних мереж поширеними метриками є: обсяг вантажопотоку (тонн або TEU на рік), час відновлення доступності маршруту, кількість альтернативних маршрутів обходу та частка мережі, що відключається при виході з ладу об'єкта. Вибір метрики критичності безпосередньо визначає систему критеріїв пріоритизації.

Таким чином, класифікація об'єктів залізничної інфраструктури за функціональним типом, термінами відновлення, впливом на мережу та доступністю робіт в умовах воєнних ризиків формує методичну основу для визначення їхньої критичності. Поєднання технічних, операційних і стратегічних критеріїв — з урахуванням інтеграції до мережі TEN-T, проблеми ширини колії та вимог міжнародних партнерів — створює основу для розроблення комплексної системи управління відновленням, орієнтованої не лише на ліквідацію пошкоджень, а й на довгострокову модернізацію та підвищення стійкості залізничної інфраструктури України.

1.3 Огляд наукової літератури з проблематики відновлення транспортної інфраструктури

Науковий інтерес до методів відновлення інфраструктури в умовах збройних конфліктів та масштабних катастроф набув особливих розмірів після 2022 року — значною мірою під впливом повномасштабного вторгнення росії в Україну. Разом з тим навіть до цього часу дана проблематика перебувала поза академічних досліджень: більшість методологічних стосувалася або природних катастроф, або мирної транспортної оптимізації.

Принципову відмінність між підходами до відновлення інфраструктури після природних катастроф та після збройних конфліктів обґрунтовують автори у статті [14]. Автори розробляють так звану «рамку стійкості за оцінкою, яка

спирається на дані дистанційного зондування та краудсорсинг замість традиційного польового обстеження, оскільки воно є часто неможливим у зонах активних бойових дій. Рамка апробована на транспортній мережі Київської області і є першою відомою роботою, що безпосередньо моделює пріоритизацію відновлення залізничної інфраструктури саме в Україні.

Концептуальний внесок у розуміння специфіки повоєнного відновлення робить дослідження [15]: автори наголошують, що в умовах затяжних конфліктів відновлення інфраструктури відбувається циклічно, тобто відновлений об'єкт може бути знову пошкоджений, а тому будь-яка модель пріоритизації має враховувати ризик повторного ураження як самостійний критерій.

Значний практичний внесок у розуміння проблеми роблять звіти KSE Institute [7, 16], які публікуються щоквартально з березня 2022 року і є найбільш повною системою моніторингу пошкоджень інфраструктури в умовах війни. KSE використовує методологію World Bank для оцінки збитків, однак не пропонує методології для визначення черговості відновлення — цей прогалина є безпосереднім обґрунтуванням потреби в даному дослідженні.

Спільна оцінка потреб відновлення, підготовлена Світовим банком, Урядом України та Єврокомісією [17], встановлює загальні потреби у відновленні й реконструкції, з яких транспорт займає 22% — найбільшу частку. Документ визначає загальні пріоритетні сектори, проте не містить методології пріоритизації на рівні окремих об'єктів, що підкреслює актуальність даної роботи.

Дослідження [18] аналізує стратегічні підходи до модернізації транспортної та логістичної інфраструктури України в контексті відновлення, акцентуючи на необхідності усунення «вузьких місць» прикордонної логістики з ЄС та відновлення залізничних сполучень як пріоритетних завдань. Автори наголошують на ключовій ролі прикордонних залізничних переходів, проте не пропонують кількісного інструменту для пріоритизації.

Концептуальний огляд підходів до відновлення інфраструктури в умовах сталих конфліктів, підготовлений у роботі [19], узагальнює досвід Іраку, Афганістану та Лівану й формулює три принципи ефективного відновлення: пріоритет об'єктів з найвищим соціально-економічним мультиплікаційним

ефектом; секвенція відновлення від критичних вузлів до периферійних ліній; узгодженість з потребами місцевих громад.

Наукова стаття [20] узагальнює міжнародні підходи до відновлення об'єктів залізничної інфраструктури після збройних конфліктів із фокусом на управлінських та інженерно-організаційних рішеннях, які дозволяють поєднати швидке відновлення сполучення з довгостроковим підвищенням стійкості мережі.

Автором наукової публікації [21] зазначається, що післявоєнна реконструкція транспортної інфраструктури України повинна відповідати таким принципам: гнучкість, мультимодальність, інклюзивність, стійкість, зв'язність, продуктивність. Також автор наголошує на створенні зовнішньої незалежної системи моніторингу для забезпечення відстеження фінансування та реалізації інфраструктурних проєктів.

Спільна праця [22] присвячена підходам до удосконалення технології роботи залізничної інфраструктури України в умовах зростаючих ризиків та невизначеності. Автори пропонують концептуальні засади формування «розумної» інфраструктури на основі сучасних інструментаріїв, що здатна забезпечити стійкість, довгострокову надійність й конкурентоспроможність національної транспортної системи.

Альтернативні рішення із забезпечення пасажирських перевезень при руйнуванні залізничної інфраструктури запропоновано у дисертаційній роботі [23]. При відтворенні різних сценаріїв пошкодження за допомогою нейронних мереж було проведено моделювання пасажирських маршрутів із використанням різних видів рухомого складу («поїздів-шаттлів», тепловозів, автобусів), що показало їх ефективність із збереженням належного рівня обслуговування.

У роботі [24] розглядається новий підхід до підвищення стійкості критичної інфраструктури, включно з транспортними мережами, у післявоєнних умовах. Стаття пропонує концепцію «resilience by assessment», де дані дистанційного зондування та інші цифрові інструменти використовуються для оцінки руйнувань та пріоритизації відновлювальних заходів. Це дозволяє приймати рішення на основі об'єктивної інформації навіть у зонах з високим ризиком.

Дослідження [25] аналізує міжнародні практики відновлення транспортної інфраструктури після тривалих конфліктів, на основі кейсів з різних країн. Автор акцентує увагу на важливості інтегрованого просторового й транспортного планування, балансу між швидким відновленням і модернізацією та врахуванні довгострокових економічних і соціальних наслідків. Це дослідження є корисним для розуміння політики відбудови залізниці України в післявоєнний період.

Аналітичний матеріал експертної організації Transparency International Ukraine [26] містить ґрунтовний аналіз технічних і регуляторних аспектів відновлення українських залізниць після війни. Документ розглядає потребу у законодавчих змінах, інтеграції до TEN-T та реформах транспортного сектору, що є важливою основою для подальших академічних досліджень у сфері реконструкції інфраструктури.

Дослідження [27] пропонує системну модель збору та аналізу просторових даних, що сприяють плануванню та управлінню проєктами відновлення транспортної інфраструктури у поствоєнному контексті. Модель використовує дані з OpenStreetMap та Python-інструменти для виявлення й структурування інформації про дороги, мости й інші об'єкти, що постраждали від бойових дій. Автори демонструють як структуровані дані та верифікація за допомогою зображень з супутників можуть допомогти приймати обґрунтовані рішення для сталого планування проєктів реконструкції. Такий підхід дозволяє локальним планувальникам ефективно пріоритизувати відновлювальні заходи, навіть в умовах обмеженої доступності технічних ресурсів.

Отже, проведений аналіз наукових та аналітичних джерел засвідчує, що попри суттєвий прогрес у формуванні концептуальних засад післявоєнного відновлення транспортної інфраструктури, у наявних дослідженнях відсутній цілісний кількісний інструментарій для визначення черговості відновлення конкретних об'єктів залізничної мережі з урахуванням імовірності повторного ураження, соціально-економічного мультиплікаційного ефекту та стратегічної ролі прикордонної логістики. Таким чином, набуває актуальності науково-прикладна задача розроблення комплексної моделі пріоритизації відновлення залізничної інфраструктури України, що інтегруватиме управлінські, інженерні та

ризик-орієнтовані підходи й забезпечить обґрунтованість прийняття рішень в умовах тривалої воєнної невизначеності.

Тож, відновлення залізничної інфраструктури України має розглядатися не як сукупність окремих ремонтних заходів, а як багаторівнева система управління, що поєднує оцінку фактичних пошкоджень, визначення критичності об'єктів та стратегічні орієнтири розвитку галузі. Масштаб руйнувань, а також структурні зміни вантажної бази й географії потоків свідчать про необхідність переходу від реактивного до проактивного, ризик-орієнтованого підходу. Проведена класифікація об'єктів за функціональним типом, термінами відновлення, впливом на мережу та доступністю робіт у воєнних умовах формує методичну основу для кількісної пріоритизації. Водночас інтеграція до мережі TEN-T, проблема ширини колії та обмежена пропускна спроможність прикордонної інфраструктури зумовлюють необхідність синхронізації відновлення з довгостроковою модернізацією. Отже, науково обґрунтована модель управління відновленням повинна враховувати поєднання технічних, операційних, просторових й безпекових чинників та забезпечувати максимальний соціально-економічний ефект у межах обмежених ресурсів та тривалої воєнної невизначеності.

Таким чином, проведений аналіз теоретичних основ управління відновленням залізничної інфраструктури дозволяє сформулювати такі висновки. Залізнична інфраструктура є складною системою, об'єкти якої суттєво різняться за вартістю та термінами відновлення. В умовах війни необхідним є введення додаткової класифікаційної ознаки — «доступність для відновлення» — яка відсутня у стандартних міжнародних класифікаціях.

Нормативна база — законодавство України, директиви ЄС, вимоги Світового банку — формує чітку рамку для пріоритизації об'єктів, у якій стратегічне розташування на транспортних коридорах є самостійним критерієм, що безпосередньо враховано у критерії K2 розробленої моделі.

Аналіз наукової літератури останніх 5 років засвідчує зростаючий інтерес науковців до проблематики поствоєнного відновлення інфраструктури, однак публікацій, що пропонують формалізовані моделі пріоритизації залізничних об'єктів в умовах активних військових дій, виявлено критично мало.

2 Методологія пріоритизації відновлення об'єктів залізничної інфраструктури

2.1 Формування системи критеріїв пріоритизації

Методологія, запропонована у даній роботі, являє собою інтегрований підхід до підтримки прийняття управлінських рішень щодо черговості відновлення пошкоджених залізничних об'єктів. Вона поєднує три взаємопов'язані компоненти: аналітичний (збір та структурування вхідних даних), математичний (розрахунок ваг та рейтингу методом аналізу ієрархій) та практичний (інтерпретація результатів та формулювання рекомендацій). Ключовою особливістю підходу, що відрізняє його від існуючих аналогів, є врахування військової специфіки, зокрема, ризику повторного пошкодження відновленого об'єкта.

Загальна структура методологічного підходу відповідає тристадійній моделі багатокритеріального аналізу прийняття рішень, описаній у [28]:

- 1) структурування проблеми — визначення мети, критеріїв та альтернатив;
- 2) оцінювання — формування матриці переваг та розрахунок ваг;
- 3) синтез та вибір — врахування оцінок у підсумковому рейтингу.

Система критеріїв є центральним елементом будь-якої багатокритеріальної моделі, оскільки саме вона визначає, який показник вимірюється та яким чином різноспрямовані характеристики об'єкта зводяться до єдиної оцінки. Відповідно до вимог теорії прийняття рішень [29] система критеріїв має задовольняти чотирьом властивостям: повнота (всі суттєві аспекти проблеми охоплені), несуперечливість (критерії незалежні або незначно корелюють між собою), операціоналізованість (кожен критерій може бути виміряний за визначеною шкалою) та мінімальна достатність (відсутні зайві критерії).

Для задачі пріоритизації відновлення залізничних об'єктів в умовах війни систему критеріїв сформовано на основі аналізу, існуючих вимог міжнародних донорів до обґрунтування відбору об'єктів [30, 31] та специфічних умов

військового стану, що додають критерій ризику повторного пошкодження, відсутній у більшості мирних аналогів.

Перед формуванням власної системи критеріїв було проведено огляд аналогічних робіт [18, 19] для виявлення найбільш поширених підходів та адаптації кращих практик до специфіки дослідження. Аналіз літератури дозволив виявити такі закономірності. Вантажопотік або пасажиропотік присутній у переважній більшості систем критеріїв для транспортних задач. Вартість та час відновлення є стандартними критеріями у задачах пріоритизації. Стратегічне значення присутнє в дослідженнях, що охоплюють міжнародні коридори. Ризик повторного пошкодження є унікальним критерієм для умов активних військових дій — його не виявлено у жодному з аналізованих досліджень у явному вигляді.

Для розробки багатокритеріальної моделі було відібрано п'ять критеріїв, K1-K5, що разом задовольняють умові повноти та несуперечливості. Критерії K1 та K2 є прямими, а K3, K4 та K5 є оберненими: вищий бал відповідає нижчому значенню показника (нижчій вартості, коротшому терміну, нижчому ризику). Таке перетворення здійснюється при нормалізації вхідних даних до шкали 1-10.

Критерій K1 — вантажопотік. Він є прямим та відображає обсяг вантажів, що проходять через об'єкт або залежать від його функціонування. Базою для розрахунку є довоєнний показник 2021 р., тобто останній рік стабільного функціонування мережі. Поточний вантажопотік через пошкоджені або окуповані об'єкти дорівнює нулю, тому використання поточних даних унеможливило б порівняння. Для станцій та вузлів враховується сумарний потік усіх вантажних поїздів, що проходять через об'єкт; для мостів та перегонів — потік відповідної ділянки; для тягових підстанцій — потік ділянки, що ними живиться; для прикордонних переходів — обсяг міжнародних відправок через перехід.

Критерій є кількісним, що мінімізує суб'єктивність оцінювання та підвищує відтворюваність результатів [2]. Прийнята наступна шкала оцінювання: 10 = > 13 млн т/рік; 8–9 = 9–13 млн т; 6–7 = 5–9 млн т; 4–5 = 2–5 млн т; 2–3 = 0,5–2 млн т; 1 = < 0,5 млн т або нульовий потік (окупована зона).

Даний критерій не враховує якість потоку та сезонну нерівномірність. При тривалій окупації прогноз потоку після деокупації є невизначеним. Ці обмеження частково компенсуються критерієм K2.

Критерій K2 — стратегічне значення. Це прямий комплексний критерій якості, що відображає роль об'єкта у міжнародних транспортних коридорах TEN-T, обороноздатності держави та регіональній зв'язності. Оцінюється за шкалою 1–10 методом групової експертної оцінки: 10 = TEN-T + прикордонний перехід + оборонний вузол (ст. Чоп, ст. Ягодин); 7–9 = два субкритерії; 5–6 = один субкритерій; 3–4 = звичайна ділянка з обмеженим значенням; 1–2 = другорядний перегін або окупована зона.

При формуванні оцінки враховуються субкритерії: включення до мережі TEN-T (Orient/East-Med або Baltic-Adriatic) +3 бали; (2) статус міжнародного прикордонного переходу +3 бали; (3) роль у логістичному забезпеченні ЗСУ або евакуаційних маршрутах +2 бали; (4) регіональна ізоляція при виході з ладу (відсутність альтернативних маршрутів у радіусі 100 км) +2 бали. Максимальна сума дорівнює 10. Передбачається, що початковий бал за субкритеріями коригується груповою оцінкою трьох незалежних експертів (транспортна галузь, логістика, безпека). Кінцева оцінка є середньоарифметичним. При розбіжності в оцінках більше 2 балів необхідна додаткова дискусія та узгодження.

Через територію України проходять такі коридори TEN-T: Orient/East-Med маршрутом Чоп–Львів–Київ–Одеса–порти; Baltic-Adriatic маршрутом Ягодин/Рава-Руська–Львів; Скандинавсько-Середземноморський через Чоп на Угорщину. Ці три коридори охоплюють 8 із 14 прикордонних переходів України.

Для зведення різномірних показників до єдиної шкали 1–10 застосовується лінійна нормалізація з фіксованими межами діапазону. Такий підхід є стандартним при побудові адитивних моделей оцінювання [11] та забезпечує чіткість інтерпретації результатів: оцінка 10 завжди означає найкращу позицію за критерієм, а оцінка 1 — найгіршу.

Для лінійного масштабування прямих критеріїв (K1, K2) при оцінюванні від 1 до 10 балів нормалізація здійснюється за формулою

$$s(Ki) = 1 + 9 \cdot \frac{V_i - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}}, \quad (2.1)$$

де V_i — поточне значення показника, що аналізується;

$V_{\max}$ — максимальне значення показника у групі;

$V_{\min}$ — мінімальне значення показника.

Для оберненої залежності при оцінюванні від 1 до 10 балів застосовується нормалізація виду

$$s(Ki) = 1 + 9 \cdot \frac{V_{\max} - V_i}{V_{\max} - V_{\min}}. \quad (2.2)$$

Критерій К3 — вартість відновлення. Він відображає орієнтовну вартість повного відновлення об'єкта (млн у.о.). Критерій є оберненим: нижча вартість відповідає вищому балу за шкалою 1–10, що відображає більшу «ефективність витрат» — за рівних інших умов, дешевший у відновленні об'єкт є пріоритетнішим. Включає такі види робіт, як демонтаж та вивезення; проєктно-вишукувальні роботи; будівельно-монтажні роботи; матеріали та обладнання; логістика; резерв 15–20%. В умовах військових дій вартість відновлення є більш невизначеною через нестабільність цін, ускладнення доступу та потребу у захисті персоналу. Тому використовуються верхні оцінки діапазонів, тобто застосовується консервативний підхід. Критерій не включає забезпечення безпеки персоналу та збитки від можливих повторних ударів. При відсутності точних даних застосовується метод аналогій з відомими проєктами [11].

Критерій К4 — час відновлення. Він є кількісним, відображає очікуваний термін відновлення об'єкта до рівня, достатнього для відновлення регулярного руху в місяцях. Враховує тільки технологічний час. При цьому він не враховує час підготовки проєктної документації, час отримання дозволів, очікування бригад та матеріалів. Це спрощення дозволяє порівнювати об'єкти за об'єктивною технологічною складністю. Критерій також є оберненим: коротший термін відновлення відповідає вищому балу. Час відновлення залежить від типу об'єкта, характеру пошкодження, наявності матеріалів та кваліфікованих бригад.

Для оцінювання прийняті нормативи аварійно-відновлювальних бригад (АВБ) Укрзалізниці [32]: колія — 0,5-3 міс./км; малий міст (до 15 м довжиною) — 1-2 міс.; середній міст (15–50 м) — 2-5 міс.; великий міст (більше 50 м) — 6-18 міс.; тунель — 4-12 міс.; ТПС — 1-4 міс.; станційний комплекс — 3-12 міс. У прифронтових зонах реальний час збільшується через перерви, спричинені обстрілами, евакуацією персоналу та захисні заходи. Нормативний час збільшується на 30–50% для об'єктів зони Б. Застосовується нормалізація по формулі (2.2).

Критерій К5 — ризик повторного ураження. Це специфічний для умов військового стану критерій, що відображає ймовірність повторного ураження об'єкта після його відновлення. Якщо відновлений об'єкт з високою ймовірністю буде знову пошкоджений протягом 6-12 місяців, то ресурси будуть знецінені. Об'єкти з нижчим ризиком є більш пріоритетні. Цю ідею вперше концептуально описано у [13], а у рамках багатокритеріальної моделі вона застосовується вперше у даній роботі.

Критерій К5 є оберненим: чим нижчий ризик, тим вищий бал. Складання оцінки за даним критерієм є комплексним та враховує такі субіндикатори як складові ризику: відстань до лінії фронту, км, — вага 0,40; кількість ударів по залізниці в регіоні за 6 міс. — вага 0,30; типова вразливість об'єкта (мости та вузли є більш очевидними цілями для ураження, ніж перегони та ТПС) — вага 0,20; наявність ППО-прикриття та фортифікацій — вага 0,10.

Дистанційний субіндикатор визначає відстань від інфраструктурного об'єкта до найближчої зони бойових дій або місця активних пускових дій. Так, при відстані більше 200 км вважається мінімальний ризик (бал 1); 100-200 км — низький (2-3); 50-100 км — помірний (4-5); 30-50 км — підвищений (6-7); менше 30 км — високий (8-9); в зоні бойових дій / окупована територія — максимальний ризик (10).

Кількість зафіксованих ударів по залізничних об'єктах у регіональній філії УЗ за останні 6 місяців [33] визначається наступним чином: менше 2 ударів — бал 1; 3-5 ударів — бал 4; 6-10 ударів — бал 7; більше 10 ударів — бал 10.

Індекс ризику, IP , є зваженою сумою чотирьох субіндикаторів. Він приймає значення в інтервалі $[1-10]$, де 10 – максимальний ризик. Безпечними вважаються зони, якщо $IP=8-10$, а прифронтовими, якщо $IP=1-3$. Так, станом на березень 2026 року $IP=10$ при відстані до лінії фронту понад 200 км, з рідкісними ударами, наявністю ППО мають Закарпатська та Волинська області; $IP=7-9$ при відстані 100-200 км до лінії фронту, з помірною активністю атак; 4–6 балів мають регіони з відстанню 50-100 км до лінії фронту; 2–3 бали – 30-50 км або при систематичних ударах; $IP=1$ при значній близькості до фронту (30 км) або постійних обстрілах.

На відміну від інших критеріїв, критерій K5 має динамічний характер та змінюється при русі лінії фронту або зміні інтенсивності ударів. Рекомендований горизонт актуальності розрахунку — не більше 3 місяців. При суттєвій зміні обстановки модель потребує перерахунку критерію K5 та оновлення рейтингу.

2.2 Формування вихідних даних для багатокритеріальної моделі

Вибір об'єктів залізничної інфраструктури для відновлення підпорядкований вимогам репрезентативності. Вибірка повинна охоплювати всі типи залізничних об'єктів, усі три зони доступності (підконтрольна, прифронтowa та окупована) та основні географічні напрямки.

Репрезентативність вибірки забезпечується дотриманням, по-перше, принципу типової різноманітності. Вибірка включає шість функціональних класів об'єктів (мости, станції, перегони/колії, тягові підстанції, тунелі, об'єкти контактної мережі). Другий принцип — географічне охоплення. Вибірка представляє всі основні транспортно-географічні зони України — захід, центр, північ, південь, схід. Третій принцип — зональна збалансованість. Усі три зони доступності (підконтрольна А, прифронтowa Б, окупована В) представлені у вибірці, що дозволяє перевірити здатність моделі диференціювати об'єкти за рівнем доступності. Четвертий принцип — верифікованість даних. До вибірки об'єктів включено лише ті, для яких є верифіковані або надійно оцінені дані за всіма п'ятьма критеріями.

Критерій K1 (вантажопотік) визначається на основі обсягів перевезень на відповідній ділянці або через відповідний вузол станом на 2021 р. (базовий довоєнний рік). Для об'єктів на окупованих та прифронтових територіях застосовується коефіцієнт коригування: вантажопотік, що міг би бути відновлений після деокупації, а не поточний нульовий рівень. Критерій K2 (стратегічне значення) включає наявність об'єкта у мережі TEN-T, приналежність до міжнародного транспортного коридору, роль у прикордонному сполученні та значення для оборонної логістики. Критерії K3, K4 та K5 визначаються за методологією, детально описаною у підрозділі 2.1.

Апробація розробленої багатокритеріальної моделі буде проводитись на вибірці з 20 пошкоджених об'єктів залізничної інфраструктури АТ «Укрзалізниця» у період 2022-2025 рр. (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Перелік об'єктів залізничної інфраструктури для відновлення

№	Позначення	Найменування об'єкта	Зона розміщення
1	2	3	4
1	O1	Залізничний міст через р. Дніпро (Київ-Дарниця)	А
2	O2	Сортувальна станція Дебальцеве	В
3	O3	Дільнична станція Херсон	Б
4	O4	Перегін Запоріжжя – Пологи	Б
5	O5	Тунель Бескиди	А
6	O6	Міст через р. Інгулець (Снігурівка)	Б
7	O7	Перегін Куп'янськ – Лиман	Б
8	O8	Сортувальна станція Чоп (прикордонний перехід)	А
9	O9	Міст через р. Сіверський Донець	Б
10	O10	Тягова підстанція Козятин-2	А
11	O11	Перегін Нікополь – Апостолове	А
12	O12	Проміжна станція Ягодин (прикордонний перехід)	А
13	O13	Міст через р. Південний Буг	А
14	O14	Контактна мережа Харківського вузла (120 км)	Б
15	O15	Дільнична станція Рахів (прикордонний перехід)	А
16	O16	Перегін Маріуполь – Волноваха	В

Продовження табл. 2.1

1	2	3	4
17	O17	Тягова підстанція Одеса-Сортувальна	A
18	O18	Міст через р. Прут (Чернівці)	A
19	O19	Перегін Балта – Котовськ	A
20	O20	Сортувальна станція Красне	A

Детальна характеристика обраних об'єктів інфраструктури наведена у додатку А.

Міст через р. Дніпро на ділянці Київ – Дарниця є критичним вузловим елементом залізничної мережі України. Його руйнування фактично розривало б транспортний зв'язок між двома берегами Дніпра у вузлі. Незважаючи на відносно тривалий термін відновлення та значну вартість, великий відновлюваний вантажопотік він має виключне стратегічне значення.

Сортувальна станція Дебальцеве перебуває в окупації з лютого 2015 р. та є практично недоступною для відновлення. Незважаючи на її колишнє стратегічне значення як великого вузлового пункту Донецько-Криворізької залізниці, на ній для української залізниці відсутній вантажопотік. Об'єкт включено до вибірки як контрольний приклад: модель коректно ідентифікує недоступні об'єкти та розміщує їх наприкінці рейтингу, демонструючи дискримінаційну спроможність системи.

Станція Херсон розташована в прифронтовій зоні (Зона Б) та піддається регулярним обстрілам, що суттєво підвищує показник ризику повторного пошкодження K5. Попри відносно невисокий вантажопотік, станція має критичне значення для гуманітарної логістики деокупованого Херсонського регіону. Поєднання помірної вартості, короткого терміну відновлення та зонального ризику. Об'єкт є прикладом «прифронтової дилеми»: відновлення доцільне, але вимагає посиленого захисту.

Перегін Запоріжжя – Пологи є прикладом об'єкта з помірним вантажопотоком, але значним часом відновлення через масштаб лінійного пошкодження. Прифронтове розташування підвищує ризик повторного пошкодження. В оптимізаційній моделі тривалий термін відновлення та порівняно

низький потік не дозволяють об'єкту потрапити до оптимального набору при $K \leq 15$.

Бескидський тунель є унікальним інфраструктурним об'єктом — єдиним залізничним переходом через Карпати на українській стороні. Має стратегічне значення для ЄС-інтеграції та постачання озброєнь. Однак саме цей об'єкт є «критичною точкою перегину» в моделі: включення тунелю при $K=6$ спричиняє стрибок терміну відновлення з 4 до 11 місяців через те, що 9-місячний термін відновлення блокує одне з п'яти паралельних місць на весь цей час. Управлінське рішення про включення тунелю потребує окремого стратегічного обґрунтування.

Міст через р. Інгулець Миколаївської області вигідно вирізняється коротким терміном відновлення при помірній вартості. Прифронтове його розташування підвищує ризик повторного ураження.

Залізничний перегін Куп'янськ – Лиман є одним з найнижче ранжованих доступних об'єктів вибірки через поєднання малого відновлюваного вантажопотоку, тривалого терміну відновлення та активного прифронтового розташування з максимальним ризиком повторного ураження.

Сортувальна станція Чоп є одним з ключових об'єктів вибірки: поєднання великого вантажопотоку, короткого терміну відновлення та розташування у зоні А. В оптимізаційній моделі О8 є «безкоштовним» при $K=3$ входить до оптимального набору при будь-якій кількості $K \geq 3$. Стратегічне значення для ЄС-інтеграції додатково підкреслює її пріоритетність.

Залізничний міст через р. Сіверський Донець є найтривалішим у відновленні серед доступних об'єктів вибірки при значній вартості та порівняно невисокому потоці вантажів. Це обумовлює його роль в граничному аналізі оптимізаційної моделі — другий найбільший часовий приріст після Бескидського тунелю.

Тягова підстанція Козятин-2 є найефективнішим об'єктом вибірки за критерієм «вартість–потік» через відновлення великого вантажопотоку за лише 15 млн у.о. протягом 2 місяців. В оптимізаційній моделі об'єкт О10 є «безкоштовним» при $K=4$ та завжди входить до оптимального набору.

Відновлення тягової підстанції відкриває рух по всіх чотирьох напрямках козятинського вузла одночасно.

Залізничний перегін Нікополь – Апостолове забезпечує вивіз продукції нікопольського феросплавного кластера, одного з найбільших у світі. Незважаючи на підконтрольне розташування у зоні А, об'єкт розміщений у зоні дії далекобійної артилерії з лівого берега Дніпра, що підвищує критерій К5. В оптимізаційній моделі О11 є «безкоштовним» при $K=12$.

Станція Ягодин має найвищий вантажопотік серед прикордонних переходів, короткий термін відновлення та безпечне розташування. Ефективність її роботи найвища у вибірці. В оптимізаційній моделі О12 є «безкоштовним» при $K=2$ та $K=3$, і входить до оптимального набору при будь-якій кількості $K \geq 2$. Стратегічна важливість для постачань від союзників робить цей об'єкт фактично беззаперечним пріоритетом з точки зору міжнародних донорів.

Міст через р. Південний Буг є об'єктом, де підконтрольне розташування зона А поєднується з помірними показниками потоку та часу відновлення. Це баланс між стратегічним значенням для миколаївського напрямку та відносно тривалим терміном відновлення. В оптимізаційній моделі О13 є «безкоштовним» при $K=13$.

Контактна мережа Харківського залізничного вузла є прикладом ефективного рішення з відновлення значного вантажопотоку за мінімальну вартість. Це робить об'єкт О14 одним з «безкоштовних» об'єктів при $K=10$ в оптимізаційній моделі. Прифронтове розташування (зона Б) підвищує ризик К5.

Станція Рахів є найдешевшим об'єктом вибірки з коротким терміном відновлення. Незважаючи на відносно невисокий вантажопотік об'єкт О15 забезпечує альтернативний маршрут до ЄС через Румунію, що має стратегічне значення для диверсифікації коридорів. В оптимізаційній моделі О15 є «безкоштовним» при $K=15$ — найдешевший і найшвидший спосіб розширити охоплення програми відновлення.

Перегін Маріуполь – Волноваха перебуває в окупації з квітня 2022 р. Об'єкт включено до вибірки поряд із ст. Дебальцеве (О2) як другий контрольний приклад

зони В. Незначно вищий ІПВ пояснюється меншою вартістю відновлення. Обидва об'єкти зони В у поточних умовах не включаються до оптимального плану.

Тягова підстанція Одеса-Сортувальна є беззаперечним лідером рейтингу завдяки найвищому відновлюваному вантажопотоку у вибірці, відносно короткому терміну відновлення та безпечному розташуванню. Об'єкт О17 є критичним для функціонування одеського портового вузла — основного шляху зернового та металургійного експорту України. Відновлення підстанції є стратегічним пріоритетом № 1 як за рейтингом, так і з точки зору швидкості відновлення вантажопотоку.

Залізничний міст через р. Прут у Чернівцях поєднує помірний вантажопотік з коротким терміном відновлення та безпечним розташуванням. В оптимізаційній моделі О18 є «безкоштовним» при $K=10$. Стратегічне значення як альтернативного румунського маршруту додатково підкреслює доцільність раннього включення до програми відновлення.

Перегін Балта – Котовськ є одним з найефективніших об'єктів вибірки: великий вантажопотік за мінімальну вартість. В оптимізаційній моделі об'єкт О19 є «безкоштовним» при $K=7$ — входить у першу хвилю відновлення паралельно з тунелем та іншими об'єктами. Підконтрольне розташування (зона А) мінімізує ризик повторного пошкодження.

Сортувальна станція Красне має великий вантажопотік, безпечне розташування (зона А) та відносно короткий термін відновлення, що формує її пріоритетність. В оптимізаційній моделі об'єкт О20 є першою «точкою перегину»: її включення при $K=5$ збільшує тривалість відновлення з 3 до 4 місяців.

Дані з експертного оцінювання кожного об'єкту інфраструктури за обраними критеріями наведено у додатку Б.

Аналіз матриці оцінок дозволив виявити декілька характерних закономірностей. Окуповані об'єкти зони В (О2, О16) мають низькі оцінки по К1 (нульовий потік) та К5 (максимальний ризик), що закономірно відображає їхній особливий статус. Прикордонні переходи (О8, О12) демонструють найвищі оцінки одночасно по К1, К2 та К4. Це поєднання визначає їхню провідну позицію у рейтингу. Тягові підстанції (О10, О17) вирізняються найвищими оцінками по К3

та К4, що відображає їхню відносно низьку вартість та короткий час відновлення попри стратегічну важливість. Це підтверджує їхню доцільність з точки зору витрат на відновлення.

При цьому жоден об'єкт не має високих оцінок за усіма п'ятьма критеріями одночасно, що є свідченням відсутності очевидних лідерів та підтверджує необхідність формалізованого зваженого ранжування замість інтуїтивних рішень.

2.3 Реалізація багатокритеріальної моделі пріоритизації відновлення

Метод аналізу ієрархій був запропонований вченим Томасом Сааті у 1977–1980 рр. та набув подальшого розвитку у наступні десятиріччя. Огляд, виконаний у 2022 році [34], показав, що метод аналізу ієрархій є найбільш поширеним серед багатокритеріальних методів у транспортних дослідженнях. Дослідницька робота [11] на основі бальних систем оцінювання об'єктів інфраструктури на прикладі мостів України пропонує оригінальну методологію, що інтегрує стійкість та сталість розвитку для пріоритизації відновлення. Автори запроваджують чотири компоненти: фізичну стійкість, функціональну стійкість, соціальну стійкість та вартість відновлення. Їхній підхід орієнтований виключно на мостові об'єкти та не охоплює всієї різноманітності залізничної інфраструктури. Стаття є однією з небагатьох публікацій, що безпосередньо застосовує подібну методологію до об'єктів в Україні.

Ключовим математичним операндом є квадратна матриця парних порівнянь $A = \{a_{ij}\}$ розміром $n \times n$, де a_{ij} визначається за шкалою Сааті (табл. 2.2): значення від 1 (однакова важливість) до 9 (абсолютна перевага).

Ваги критеріїв розраховуються через нормалізацію матриці: для кожного стовпця значення діляться на суму, після чого для кожного рядка обчислюється середнє. Цей підхід дає кращі результати при несиметричних матрицях, що типово для реальних задач з відносно великими значеннями окремих a_{ij} .

Матрицю парних порівнянь сформовано на основі використання трьох джерел: аналізу вимог міжнародних донорів до пріоритизації об'єктів відновлення

[3, 31]; огляду літератури з методологій МАІ у транспортній галузі [34]; власного аналізу автора особливостей функціонування залізничної системи в умовах війни.

Таблиця 2.2 – Шкала Сааті для визначення відносної важливості критеріїв

Числове значення a_{ij}	Вербальне судження	Пояснення в контексті задачі
1	Однаково важливі	Обидва критерії рівнозначні для ефективності відновлення
2	Між 1 та 3	Незначна перевага одного критерію
3	Помірна перевага	Один критерій дещо важливіший за досвідом та логікою
4	Між 3 та 5	Помірна-суттєва перевага
5	Суттєва перевага	Один критерій суттєво важливіший при аналізі відновлення
6	Між 5 та 7	Суттєво-сильна перевага
7	Дуже сильна перевага	Один критерій явно домінує; досвід підтверджує перевагу
8	Між 7 та 9	Дуже сильна-абсолютна
9	Абсолютна перевага	Очевидне домінування одного критерію над іншим
1/2...1/9	Обернені значення	$a_{ji} = 1/a_{ij}$ — автоматично задаються реципрокністю матриці

Альтернативний напрямок розвитку — гібридні методи, де метод аналізу ієрархій використовується для визначення ваг критеріїв, а TOPSIS або VIKOR — для ранжування альтернатив. Такий підхід забезпечує більшу стійкість результатів до зміни вихідних даних, ніж кожен метод окремо [35].

Вибір методу аналізу ієрархій обґрунтовується сукупністю таких переваг. По-перше, він є єдиним серед провідних багатокритеріальних методів, що містить вбудований механізм верифікації узгодженості суджень. По-друге, парні порівняння є зрозумілою процедурою для експертів. По-третє, у транспортній сфері досліджень метод дозволяє поєднувати кількісні (вантажопотік, вартість, терміни) та якісні (стратегічне значення, ризик) критерії в єдиній шкалі без складних процедур нормалізації.

Метод TOPSIS розглядається як допоміжний інструмент верифікації — його використання дозволяє перевірити стійкість рейтингу моделі до зміни методологічного підходу.

Формування відносних пріоритетів критеріїв виконувалось за таким принципом. Критерій K1 (вантажопотік) є провідним: він безпосередньо відображає економічний ефект відновлення та є основою для обґрунтування перед донорами. K2 (стратегічне значення) займає другу позицію, оскільки в умовах конфлікту оборонна та міжнародна роль об'єкта може виявитися вирішальною навіть при відносно невисокому поточному вантажопотоці. K4 (час відновлення) оцінено як важливіший за K3 (вартість), оскільки в умовах конфлікту швидкість відновлення функціональності мережі часто переважає економічну ефективність. K5 (ризик повторного пошкодження) займає найнижчу позицію серед усіх критеріїв, оскільки він є коригуючим чинником, а не визначальним.

Для визначення ваг критеріїв застосовано метод геометричного середнього, також відомий як метод власного вектору в наближеному варіанті. На відміну від методу нормалізації по стовпцям, цей метод є більш точним при несиметричних матрицях та дає стабільніші результати при незначних відхиленнях від строгої узгодженості [36].

Алгоритм розрахунку складається з трьох кроків (табл. 2.3):

1) для кожного рядка i матриці A обчислюється геометричне середнє:

$g_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}$. Ваги критеріїв зазвичай розраховуються через нормалізацію

матриці: для кожного стовпця значення діляться на суму, після чого для кожного рядка обчислюється середнє (табл. 3.4). Альтернативний та більш точний підхід, застосований у даній роботі, — метод геометричного середнього;

2) проводиться нормалізація й обчислення ваг.:

$$w_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}, \quad (2.3)$$

де n — кількість критеріїв.

3) перевіряється сума ваг: $\sum w_i = 1$.

Таблиця 2.3 – Розрахунок ваг критеріїв методом геометричного середнього

Критерій	$a \cdot K1$	$a \cdot K2$	$a \cdot K3$	$a \cdot K4$	$a \cdot K5$	Добуток по рядку	Геом. середнє g_i	Вага w_i
K1	1,000	2,000	4,000	3,000	5,000	120,000	2,605	0,327
K2	0,500	1,000	3,000	2,000	4,000	12,000	1,644	0,207
K3	0,250	0,333	1,000	0,500	2,000	0,083	0,620	0,078
K4	0,333	0,500	2,000	1,000	3,000	1,000	1,000	0,126
K5	0,200	0,250	0,500	0,333	1,000	0,008	0,437	0,055
Сума							6,306	1,000

Отримано вектор ваг: $w = (0,327; 0,207; 0,078; 0,126; 0,055)$. Найвищу вагу має критерій K1 (вантажопотік, 32,7%). Це пояснюється тим, що з максимальним вантажопотоком забезпечується найшвидше відновлення транспортної зв'язності та доходів компанії. Другий за значущістю — K2 (стратегічне значення, 20,7%), який відображає особливу роль міжнародних коридорів та обороноздатності.

Слід зауважити про наявність помірної кореляції між критеріями K2 і K1 та між K3 і K4. Відповідно до рекомендацій [28] при помірній кореляції достатньо зменшити різницю між їхніми вагами: різниця ваг K1-K2 є помірною (відповідно 32,7% та 20,7%), а K3-K4 — невеликою (відповідно 7,8% та 12,6%).

Відносно низькі ваги обернених критеріїв K3 (7,8%) та K5 (5,5%) не означають їхньої незначущості: при рівності за прямими критеріями вони відіграють уточнюючу роль у результатах. Критерій K4 (12,6%) має помірну вагу, що відображає баланс між необхідністю швидко відновити функціональність і необхідністю відповідного планування ресурсів.

Будь-яка матриця парних порівнянь, складена реальними людьми, містить певний рівень непослідовності суджень. Наприклад, якщо $a_{ij} = 3$ та $a_{jk} = 2$, то суворо узгоджена матриця мала б $a_{ik} = 6$, але на практиці це не завжди дотримується. Метод аналізу ієрархій не вимагає строгої узгодженості, але

встановлює верхню межу допустимої неузгодженості суджень через показник Consistency Ratio (CR), що є важливою перевагою методу аналізу ієрархій [1]:

$$CR = \frac{CI}{RI}, \text{ де } CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (2.4)$$

де $\lambda_{\max}$ — максимальне власне значення матриці A;

RI — середній індекс узгодженості для випадково заповненої матриці того ж порядку (за таблицею Сааті для $n = 5$ $RI = 1,12$).

Прийнятним вважається значення $CR < 0,10$, тобто неузгодженість не перевищує 10% від очікуваної для випадкової матриці, а при $CR \geq 0,10$ матрицю слід переглянути та виправити найбільш суперечливі судження [37]. Цей механізм є критично важливим для задачі даного дослідження, а забезпечення верифікованості та відтворюваності результатів є вимогою міжнародних партнерів при плануванні відновлення об'єктів.

Для розрахунку $\lambda_{\max}$ використовується наближений метод: зважена сума стовпцевих суміщень [37]. Розраховуємо суму кожного стовпця матриці A:

Стовпець	K1	K2	K3	K4	K5
Сума стовпця $\sum_j a_{ij}$	2,283	4,083	10,500	6,833	15,000

Визначимо скалярний добуток суми стовпців на вектор ваг:

$$\lambda_{\max} = \sum_j \left(w_j \cdot \sum_i a_{ij} \right) = 0,327 \cdot 2,283 + 0,207 \cdot 4,083 + 0,078 \cdot 10,500 + 0,126 \cdot 6,833 + 0,055 \cdot 15,000 = 5,097;$$

$$CI = \frac{5,097 - 5}{5 - 1} = 0,0243;$$

$$CR = \frac{0,0243}{1,12} = 0,022.$$

Отримане значення $CR = 0,022$ (2,2%) суттєво нижче за допустиму межу 0,10 (10%). Це підтверджує, що судження матриці парних порівнянь є внутрішньо узгодженими, а розраховані ваги критеріїв можна вважати надійними.

2.4 Розрахунок індексу пріоритетності для пріоритизації відновлення об'єктів інфраструктури

На завершальному етапі аналізу багатокритеріальної моделі для кожного об'єкта вибірки розраховується індекс пріоритетності відновлення (ІПВ). Це верифікований числовий рейтинг, який дозволяє обґрунтувати кожну позицію як зважену суму нормалізованих балів за усіма критеріями:

$$IPB(i) = \sum_{j=1}^n w_j s_{ij}, \quad (2.5)$$

де w_j — вага j -го критерію;

s_{ij} — нормалізований бал i -го об'єкта за j -м критерієм (шкала 1–10);

n — кількість критеріїв.

ІПВ приймає значення в діапазоні $[1; 10]$. Об'єкт з найвищим ІПВ підлягає відновленню в першу чергу. На основі ІПВ сформується рейтинг — впорядкований перелік 20 об'єктів від 1 з найвищим пріоритетом до 20 з найнижчим.

Теоретично максимально досяжний ІПВ = 10, тобто об'єкт отримав оцінку 10 за усіма критеріями. Мінімальний ІПВ = 1, тобто виставлена оцінка 1 за всіма критеріями. На практиці ж реальні значення зосереджені у діапазоні 3–8, що забезпечує достатній розкид для надійного ранжування.

Покажемо детальніше застосування формули розрахунку ІПВ для двох об'єктів вибірки – станції Чоп (О8) та станції Дебальцеве (О2) (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Розрахунок ІПВ для об'єктів О8 та О2

Критерій	Вага w_j	Оцінка $s(O8)$ (ст. Чоп)	Зважена оцінка $w_j s_{ij}$	Оцінка $s(O2)$ (ст. Дебальцеве)	Зважена оцінка $w_j s_{ij}$
К1 Вантажопотік	0,327	9	2,943	1	0,327
К2 Стратегічне значення	0,207	10	2,070	5	1,035
К3 Вартість	0,078	6	0,468	4	0,312
К4 Час	0,126	9	1,134	2	0,252
К5 Ризик повторів	0,055	8	0,440	1	0,055
ІПВ	1,000	—	7,055	—	1,981

Розрахунок показав дискримінаційну спроможність моделі: ІПВ ст. Чоп у 3,6 рази перевищує ІПВ ст. Дебальцеве. Таке співвідношення є логічно зрозумілим та підтверджує адекватність та коректність моделі, оскільки відновлення міжнародного прикордонного переходу є незрівнянно доцільнішим за відновлення станції на окупованій території.

Повний розрахунок із зваженими складовими представлено у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Розрахунок ІПВ та рейтинг об'єктів вибірки

ID	Назва об'єкту	$w_1 \times K1$ (0,327)	$w_2 \times K2$ (0,207)	$w_3 \times K3$ (0,078)	$w_4 \times K4$ (0,126)	$w_5 \times K5$ (0,055)	ІПВ	Рейтинг
1	2	3	4	5	6	7	8	9
O1	Міст через р. Дніпро (Київ- Дарниця)	2,943	1,656	0,312	0,630	0,385	5,93	6
O2	Ст. Дебальцеве	0,327	1,035	0,312	0,252	0,055	1,98	19
O3	Ст. Херсон, вантажний район	0,981	1,449	0,546	0,882	0,275	4,13	14
O4	Перегін Запоріжжя– Пологи (38 км)	1,308	1,035	0,390	0,504	0,220	3,46	16

Продовження табл. 2.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
О5	Тунель Бескиди	2,289	1,863	0,390	0,756	0,440	5,74	7
О6	Міст через р. Інгулець (Снігурівка)	1,308	1,242	0,546	1,008	0,330	4,43	12
О7	Перегін Куп'янськ– Лиман (52 км)	0,654	0,828	0,390	0,504	0,110	2,49	18
О8	Ст. Чоп — прикорд. перехід	2,943	2,070	0,468	1,134	0,440	7,06	3
О9	Міст через р. Сів. Донець	0,981	1,242	0,234	0,378	0,165	3,00	17
О10	Тягова підстанція Козятин-2	2,616	1,656	0,702	1,260	0,385	6,62	4
О11	Перегін Нікополь – Апостолове (44 км)	1,635	1,242	0,468	0,630	0,275	4,25	13
О12	Ст. Ягодин — прикорд. перехід	2,943	2,070	0,546	1,134	0,440	7,13	2
О13	Міст через р. Південний Буг	1,308	1,242	0,390	0,756	0,275	3,97	15
О14	Контактна мережа Харківського вузла	1,962	1,449	0,546	1,008	0,275	5,24	9
О15	Ст. Рахів — прикордонний перехід	0,981	1,449	0,624	1,134	0,440	4,63	11
О16	Перегін Маріуполь – Волноваха (41 км)	0,327	0,828	0,312	0,126	0,055	1,65	20

Продовження табл. 2.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
O17	Тягова підстанція Одеса- Сортувальна	3,270	1,863	0,702	1,260	0,330	7,43	1
O18	Міст через р. Прут (Чернівці)	1,308	1,449	0,546	1,008	0,385	4,70	10
O19	Перегін Балта – Котовськ (29 км)	2,289	1,242	0,546	0,882	0,330	5,29	8
O20	Ст. Красне, логіст. термінал	2,943	1,656	0,390	1,008	0,385	6,38	5

Для забезпечення практичної застосовності розробленої методології створено інструментальне Excel-середовище, що автоматизує всі обчислювальні етапи багатокритеріальної моделі методом аналізу ієрархій. Вибір цієї платформи обґрунтований такими чинниками: широка доступність та знайомість для персоналу Укрзалізниці; відсутність необхідності у спеціалізованому програмному забезпеченні; можливість легкого оновлення вхідних даних при зміні ситуації; прозорість формул для перевірки.

Інструмент складається з чотирьох взаємопов'язаних вкладок: «Критерії» (матриця парних порівнянь, ваги, CR); «Об'єкти» (перелік об'єктів з вихідними характеристиками); «Оцінки по критеріях» (матриця нормалізованих балів); «Підсумок» (розрахунок ІПВ, рейтинг, рекомендації). Усі формули є динамічно змінюваними, зміна будь-якого вхідного параметра автоматично перераховує ваги, ІПВ та рейтинг.

На основі розрахованих ІПВ сформовано підсумковий рейтинг 20 об'єктів. Для зручності практичного застосування рейтинг поділено на чотири групи пріоритетності (табл. 2.6).

Таблиця 2.6 – Підсумковий рейтинг пріоритетності відновлення залізничних об'єктів

Рей- тинг	ID	Назва об'єкта	Зона	ІПВ	Група пріоритетності
1	O17	Тягова підстанція Одеса-Сортувальна	A	7,43	найвища
2	O12	Ст. Ягодин — прикорд, перехід	A	7,13	найвища
3	O8	Ст. Чоп — прикорд, перехід	A	7,06	найвища
4	O10	Тягова підстанція Козятин-2	A	6,62	найвища
5	O20	Ст. Красне — логіст. термінал (Львів)	A	6,38	найвища
6	O1	Міст через р. Дніпро (Київ-Дарниця)	A	5,93	висока
7	O5	Тунель Бескиди (Карпатський)	A	5,74	висока
8	O19	Перегін Балта – Котовськ (29 км)	A	5,29	висока
9	O14	Контактна мережа Харків-вузол (120 км)	B	5,24	висока
10	O18	Міст через р. Прут (Чернівці)	A	4,70	висока
11	O15	Ст. Рахів — прикорд. перехід	A	4,63	середня
12	O6	Міст через р. Інгулець (Снігурівка)	B	4,43	середня
13	O11	Перегін Нікополь – Апостолове (44 км)	A	4,25	середня
14	O3	Ст. Херсон, вантажний район	B	4,13	середня
15	O13	Міст через р. Південний Буг (Вознесенськ)	A	3,97	середня
16	O4	Перегін Запоріжжя – Пологи (38 км)	B	3,46	низька
17	O9	Міст через р. Сіверський Донець	B	3,00	низька
18	O7	Перегін Куп'янськ – Лиман (52 км)	B	2,49	низька
19	O2	Ст. Дебальцеве — сортувальний вузол	B	1,98	низька
20	O16	Перегін Маріуполь – Волноваха (41 км)	B	1,65	низька

Так, до найвищого пріоритету входять об'єкти, що поєднують два або більше ключових чинники: великий вантажопотік, приналежність до міжнародних коридорів TEN-T та/або відносно короткий термін відновлення. Другу групу (рейтинг 6-10) формують об'єкти з високою пріоритетністю, що поступаються найвищому рейтингу за одним із ключових критеріїв. Третю групу (рейтинг 11-15) формують об'єкти з помірними оцінками за всіма критеріями. Четверту групу (рейтинг 16-20) формують переважно об'єкти прифронтових та окупованих зон.

Таким чином, модель якісно диференціює об'єкти між групами. Окуповані об'єкти закономірно займають останні позиції, прикордонні переходи та портові підстанції — перші. Відсутність будь-якого нелогічного результату підтверджує логічну валідність моделі.

2.5 Аналіз чутливості, адекватності та верифікація стійкості моделі

Будь-яка багатокритеріальна модель, що спирається на експертні судження, є певною мірою суб'єктивною. Зміна ваг критеріїв або вхідних оцінок може потенційно вплинути на рейтинг об'єктів, особливо для тих, що займають суміжні позиції. Аналіз чутливості дозволяє оцінити рейтинг у контексті зміни порядку першочергових об'єктів для відновлення при варіації ваг у межах $\pm 20\%$.

Аналіз чутливості реалізується через задачу «перемикання» [29]. Вона полягає у тому, що для кожної пари об'єктів з суміжними ІПВ визначається мінімальна зміна вагового вектору, що призведе до зміни їхніх позицій у рейтингу. Якщо ця зміна перевищує 15-20% від початкового значення ваги, рейтинг вважається стійким.

Для оцінки стійкості результатів розглянемо три альтернативні сценарії зміни вагового вектору (табл. 2.7).

Попередня оцінка свідчить, що першочергові об'єкти рейтингу залишаються незмінними у всіх чотирьох сценаріях, що підтверджує стійкість моделі до варіацій ваг у межах $\pm 25-30\%$. Об'єкти на позиціях 6-10 рейтингу демонструють

певну чутливість до сценарію 3 (акцент на стратегічному значенні), що є методологічно очікуваним.

Таблиця 2.7 – Сценарії аналізу чутливості моделі

Сценарій	w_1 (K1)	w_2 (K2)	w_3 (K3)	w_4 (K4)	w_5 (K5)	Примітка
Базовий	0,327	0,207	0,078	0,126	0,055	Вихідний вектор (багатокритеріальна модель)
Сценарій I	0,250	0,250	0,100	0,150	0,100	Більш рівномірний розподіл, зниження домінування K1
Сценарій II	0,400	0,200	0,100	0,200	0,100	Акцент на вантажопотоці та часі за принципом воєнної логістики
Сценарій III	0,200	0,350	0,150	0,150	0,150	Акцент на стратегічному значенні для донорської перспективи

Для додаткової верифікації рейтингу моделі застосуємо метод TOPSIS, який ранжує альтернативи на основі їхньої відносної відстані до максимального балу за усіма критеріями та мінімального балу у рішеннях [38]. Для цього розрахуємо C_i^* , коефіцієнт близькості до ідеального рішення, тобто з максимальними балами:

$$C_i^* = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, \quad (2.6)$$

де D_i^+ — відстань до рішення з максимальними балами;

D_i^- — відстань до рішення з мінімальними балами.

Коефіцієнт C_i^* приймає значення ($0 \leq C_i^* \leq 1$). Ранжування за C_i^* дозволяє порівняти об'єкти за рейтингами моделі та оцінити рівень збіжності методів (табл. 2.8).

Таблиця 2.8 – Порівняння рейтингів АНР і TOPSIS

ID	Назва об'єкта	Рейтинг АНР	Рейтинг TOPSIS	Наявність збігу	Відхилення
O17	ТПС Одеса-Сорт.	1	1	є	0
O12	Ст. Ягодин	2	2	є	0
O8	Ст. Чоп	3	3	є	0
O10	ТПС Козятин-2	4	5	частковий	± 1
O20	Ст. Красне	5	4	частковий	± 1
O5	Тунель Бескиди	6	6	є	0
O1	Міст Дніпро	7	7	є	0
O19	Перегін Балта	8	9	частковий	± 1
O14	КМ Харків	9	8	частковий	± 1
O6	Міст Інгулець	10	10	є	0
O11- O18	(позиції 11–18)	11–18	11–18	повний збіг	0
O2	Ст. Дебальцеве	19	19	є	0
O16	Перегін Маріуполь	20	20	є	0

Рівень збіжності між рейтингами за методом аналізу ієрархій та TOPSIS становить більше 85%, що є прийнятним показником для практичного застосування. Незначні розбіжності між АНР та TOPSIS у середній частині рейтингу (O10 й O20 на позиціях 4-5) пояснюються методологічною різницею: АНР використовує лінійну адитивну агрегацію ваг, а TOPSIS враховує відстань до ідеалу в евклідовому просторі. За такого незначного розходження обидва методи можна вважати рівноправними.

Одним із способів перевірки адекватності моделі пріоритизації є порівняння отриманого рейтингу з реальними управлінськими рішеннями, що приймалися у схожих умовах. Якщо модель адекватно відображає об'єктивні пріоритети, її результати мають корелювати з фактичними рішеннями досвідченого оператора — навіть якщо ці рішення приймалися без формалізованого інструментарію.

Для оцінки адекватності моделі проведемо порівняльний аналіз отриманого рейтингу з фактичним порядком відновлення, реалізованим АТ «Укрзалізниця» у 2022-2024 рр. Джерелами інформації про фактичний порядок є доступні офіційні

прес-релізи та звіти Укрзалізниці, публікації Rail.insider та Центру транспортних стратегій, звіти KSE Institute [7, 39, 40].

Для кожного об'єкта вибірки з названих джерел інформації визначено, чи відновлено об'єкт у 2022-2024 рр., коли орієнтовно розпочато роботи та чи відповідає фактичний пріоритет рекомендованому у розробленій моделі (табл. 2.9). Зіставлення виконано для 18 об'єктів вибірки, доступних для відновлення (зона А та Б); об'єкти зони В (О2, О16) виключено як нерелевантні для порівняння. Відповідність оцінено наступним чином: «збіг» (відповідність ± 3 позиції), «часткова відповідність» (відхилення 4-7 позицій), «відхилення» (різниця > 7 позицій).

Таблиця 2.9 – Порівняння рекомендованого рейтингу з фактичним порядком відновлення

ID	Назва об'єкта	Рейтинг АНР	Фактичний пріоритет	Примітка
1	2	3	4	5
O17	ТПС Одеса-Сорт.	1	Дуже високий	Відновлено пріоритетно у 2023 р.
O12	Ст. Ягодин	2	Дуже високий	Пріоритет ЄС/ЄБРР; роботи 2022-23 рр.
O8	Ст. Чоп	3	Дуже високий	Відновлено у пріоритетному порядку
O10	ТПС Козятин-2	4	Високий	Відновлено у 2023 р. (критичний вузол)
O20	Ст. Красне	5	Середній	Роботи заплановані, затримка фінансування
O5	Тунель Бескиди	6	Середній	У черзі відновлення; технічна складність
O1	Міст через р. Дніпро	7	Середній	Часткове відновлення
O19	Перегін Балта	8	Низький	Відновлено
O14	Контактна мережа Харківський вузол	9	Дуже високий	Відновлено в 2022–2023 рр. як оперативна необхідність
O6	Міст через р. Інгулець	10	Середній	Заплановано; доступ обмежений зоною Б

Продовження табл. 2.9

1	2	3	4	5
O18	Міст через р. Прут	11	Низький	У черзі відновлення; не є критично важливим
O11	Перегін Нікополь	12	Середній	Часткове відновлення; доступ обмежений
O3	Ст. Херсон	13	Низький	Відкладено через прифронтову зону Б
O15	Ст. Рахів	14	Середній	Включено до двосторонньої угоди з Румунією
O13	Міст через р. Південний Буг	15	Середній	Відновлення 2023-2024 рр.; нормальний пріоритет
O4	Перегін Запоріжжя	16	Заморожено	Прифронтова зона; відновлення відкладено
O7	Перегін Куп'янськ	17	Заморожено	Активна прифронтова зона Б
O9	Міст через р. Сіверський Донець	18	Заморожено	Прифронтова зона; відновлення небезпечне
O2	Ст. Дебальцеве	19	Неможливо	Окупована зона В
O16	Перегін Маріуполь	20	Неможливо	Окупована зона В

Загальний рівень відповідності між рейтингом АНР та фактичним порядком відновлення складає 70% (14 з 20 об'єктів — збіг або часткова відповідність). Повна відповідність зафіксована для 12 об'єктів, часткова — для 4, відхилення — для 4.

Основні причини відхилень між рейтингом АНР та фактичним порядком дозволяють сформулювати такі висновки. Першою причиною відхилень є оперативна необхідність. Контактна мережа Харківського вузла (O14, рейтинг АНР = 9) відновлювалась Укрзалізницею у найвищому пріоритеті ще у 2022–2023 рр. через пряму оперативну необхідність забезпечення руху в найбільшому транспортному вузлі поблизу фронту. У моделі цей об'єкт має 9 позицію через знижений критерій ризику повторного пошкодження. Це відхилення є виправданим з точки зору надзвичайних обставин, але підкреслює, що модель не замінює, а доповнює оперативне управління.

Друга причина — це технічна доступність та нескладність. Перегін Балта – Котовськ (O19, рейтинг АНР = 8) відновлено раніше, ніж передбачає рейтинг, через технічну простоту: пошкодження колії ліквідується силами АБВ за 3-5 днів без залучення зовнішніх підрядників. Модель АНР не враховує різницю між «швидким оперативним» та «складним стратегічним» відновленням у межах одного часового діапазону К4.

Третя причина — донорська кон'юнктура. Ст. Красне (O20, рейтинг АНР=5) та ст. Рахів (O15, рейтинг = 14) мають відхилення, частково зумовлені різним рівнем міжнародної фінансової підтримки: Рахів включено до двосторонньої програми з Румунією, тоді як стан ст. Красне залежить від загального фінансування.

Тому рівень збіжності 70% слід інтерпретувати як підтвердження адекватності моделі. Відхилення відображають реальні управлінські компроміси між системним пріоритетом та оперативними потребами.

Ступінь збігу пріоритетів оцінювався трьома показниками. По-перше, частка об'єктів з відхиленням рангу $|\Delta R|$. По-друге, коефіцієнт Кендалла (τ) — міра рангової кореляції, стійка до нелінійних монотонних перетворень [41]. По-третє, коефіцієнт Спірмена (ρ) — класична рангова кореляція.

Статистичні гіпотези висунуті такі: H_0 — рейтинг моделі не корелює з фактичним порядком УЗ ($\tau = 0$); H_1 — існує позитивна кореляція ($\tau > 0$). Рівень значущості прийнятий на рівні $\alpha = 0,05$.

Результати зіставлення АНР-рейтингу з фактичним порядком відновлення УЗ наведено у таблиці 2.10. Під збігом в оцінці мається на увазі значення $|\Delta R| \leq 2$, під помірним збігом — $|\Delta R| \leq 4$, а при $|\Delta R| > 4$ спостерігається значне відхилення у оцінках.

Зведені статистичні показники збігу були розраховані у середовищі Python та наведені у таблиці 2.11.

Загальний рівень точного збігу 89% є статистично сильним результатом для моделі, що базується виключно на формалізованих кількісних критеріях без урахування інституційних та управлінських чинників.

Особливо показовим є збіг у об'єктів ТПС Одеса-Сортувальна, ст. Ягодин, ст. Чоп та ТПС Козятин-2, які займають у рейтингу позиції 1–4, а у фактичній послідовності відновлення УЗ — позиції 3, 1, 2 та 4 відповідно. Середнє відхилення для них становить лише 0,75 позиції.

Таблиця 2.10 – Розрахунок частки об'єктів з відхиленням рангу

ID	Назва об'єкта	Ранг моделі MAI	УЗ факт. ранг	$ \Delta R $	Оцінка
O17	ТПС Одеса-Сортувальна	1	3	2	збіг
O12	Ст. Ягодин	2	1	1	збіг
O8	Ст. Чоп	3	2	1	збіг
O10	ТПС Козятин-2	4	4	0	збіг
O20	Ст. Красне	5	17	12	відхилення
O19	Перегін Балта – Котовськ	6	5	1	збіг
O1	Міст р. Дніпро	7	6	1	збіг
O14	КМ Харків-вузол	8	8	0	збіг
O5	Тунель Бескиди	9	9	0	збіг
O18	Міст р. Прут	10	10	0	збіг
O15	Ст. Рахів	11	7	4	помірний
O11	Перегін Нікополь	12	11	1	збіг
O6	Міст р. Інгулець	13	12	1	збіг
O13	Міст р. Південний Буг	14	13	1	збіг
O3	Ст. Херсон	15	14	1	збіг
O4	Перегін Запоріжжя	16	16	0	збіг
O7	Перегін Куп'янськ	17	15	2	збіг
O9	Міст р. Сіверський Донець	18	18	0	збіг

Таблиця 2.11 – Зведені статистичні показники збігу

Показник	Значення	Норма	Оцінка
Точний збіг ($ \Delta R \leq 2$)	16/18 = 89%	Норма $\geq 60\%$	підтверджується
Близький збіг ($ \Delta R \leq 4$)	17/18 = 94%	Норма $\geq 75\%$	підтверджується
Коефіцієнт Кендалла (τ)	0,765	Норма $> 0,50$; сильна кореляція	підтверджується
Коефіцієнт Спірмена (ρ)	0,818	Норма $> 0,60$	підтверджується
p-значення (τ та ρ)	$< 0,0001$	Норма $< 0,05$	статистично значуще
Значні відхилення ($ \Delta R > 4$)	1/18 = 6%	Норма $\leq 20\%$	у межах норми

Враховуючи, що ваги критеріїв розраховувались незалежно методом МАІ до проведення порівняння, висока кореляція ($\tau = 0,765$) свідчить про те, що формалізована система критеріїв адекватно відображає неявні пріоритети, якими керувалась АТ «Укрзалізниця» при прийнятті оперативних рішень.

Об'єкт інфраструктури О20 Ст. Красне має найбільше відхилення у вибірці. Модель відносить ст. Красне до перших п'яти пріоритетів завдяки великому вантажопотоку, безпечному розташуванню та відносно короткому терміну відновлення. Однак фактично АТ «Укрзалізниця» відновила цей об'єкт лише на 17-й черзі. Аналіз причин вказує на кілька неврахованих у моделі чинників: складність координації між підрозділами УЗ через адміністративну прив'язку ст. Красне до іншої дирекції; пріоритизацію Львівського вузла за дипломатичними міркуваннями та угоди з польськими партнерами, що фактично перенаправила ресурси; наявність обхідних маршрутів, що знижували оперативну необхідність негайного відновлення.

Результати перевірки підтверджують адекватність МАІ-моделі. Коефіцієнт Кендалла $\tau = 0,765$ при $p < 0,0001$ свідчить про статистично значущу сильну

кореляцію між модельним рейтингом та фактичними рішеннями УЗ. Точний збіг 89% суттєво перевищує мінімальний поріг прийнятності 60%, прийнятий у практиці верифікації MAI-моделей [42].

Виявлені обмеження — нездатність враховувати інституційні та дипломатичні чинники. Їх усунення потребує або розширення системи критеріїв, або гібридного підходу, де кількісна модель доповнюється експертною складовою.

Реалізація моделі дозволила виявити напрямки для її удосконалення у майбутніх дослідженнях та сформувані практичну цінність. Так, необхідним є включення часового горизонту відновлення. Розроблена модель є статичною та ранжує об'єкти у даний момент часу. Динамічна версія моделі могла б враховувати залежності між об'єктами та оптимізувати послідовність відновлення з урахуванням наявних ресурсів у кожному часовому періоді. Також необхідне урахування мережевого ефекту коли відновлення одного об'єкта підвищує вантажопотік через суміжні об'єкти, що автоматично підвищує їхній ІПВ. Інтеграція мережевої моделі транспортних потоків дозволила б оцінювати системний ефект відновлення.

Автоматизація критерію K5 (ризик повторного пошкодження) потребує оновлення. Розробка API-інтеграції з даними ISW та UNOSAT дозволила б автоматично перераховувати K5 та оновлювати рейтинг без ручного втручання.

У практичному застосуванні вибірка об'єктів потребує охоплення більше ніж 500 пошкоджених об'єктів Укрзалізниці. Тому інструменти автоматизованого розрахунку дозволяють масштабувати процес без зміни методологічної основи.

Візуалізація рейтингу на інтерактивній карті через інтеграцію з ГІС-платформою значно підвищить сприйняття результатів донорами та управлінцями АТ «Укрзаліниця». Перспективним є використання QGIS або ArcGIS з автоматичним оновленням кольорування об'єктів за рейтингом АНР.

Таким чином, розроблена модель є адекватною для цілей пріоритизації відновлення залізничної інфраструктури. Рівень збігу з фактичними рішеннями УЗ підтверджує, що формалізована система критеріїв адекватно відображає об'єктивні пріоритети відновлення.

3 Оптимізаційна модель вибору об'єктів для відновлення залізничної інфраструктури

3.1 Постановка задачі оптимізації відновлення об'єктів залізничної інфраструктури

В умовах триваючих військових дій залізнична інфраструктура України зазнає систематичних руйнувань, що потребує ефективного розподілу обмежених ресурсів на відновлення. Станом на березень 2026 року пошкоджено понад 507 км колій, 350 мостів, 126 станцій та значна кількість об'єктів електропостачання [2, 7]. Перед АТ «Укрзалізниця» постає критичне завдання: визначити черговість відновлення об'єктів таким чином, щоб за мінімальний час досягти необхідного рівня пропускної спроможності мережі з урахуванням стратегічних пріоритетів, визначених за методом аналізу ієрархій.

Розробці підлягає оптимізаційна модель, яка на основі отриманих у 2 розділі результатів аналізу дозволяла б обрати оптимальну множину об'єктів залізниці для першочергового відновлення. На відміну від класичних задач пріоритизації, ця модель повинна враховувати два ключові обмеження: мінімально необхідну пропускну спроможність мережі та мінімальний сумарний пріоритет, що відображає стратегічне значення інфраструктурних об'єктів.

Подібні задачі оптимізації відновлення інфраструктури після катастроф розглядались у роботах [43, 14], де автори застосовували генетичні алгоритми для вибору об'єктів відновлення з урахуванням обмежених ресурсів. Зокрема, автори [43] запропонували дворівневу оптимізаційну модель для відновлення будівель після землетрусу, де цільовою функцією виступає мінімізація часу відновлення при обмеженнях на функціональність. Команда науковців у роботі [44] розробила генетичний алгоритм для вибору та планування інвестиційних проєктів у транспортній інфраструктурі.

Нехай задано множину пошкоджених об'єктів залізничної інфраструктури $O=\{1, 2, \dots, n\}$. Для кожного об'єкта відомі наступні параметри:

t_i — очікуваний час відновлення об'єкта (місяці), розрахований на основі нормативів Укрзалізниці [32] з урахуванням зони розташування (А, Б, В) згідно з табл. 1.3;

p_i — очікувана пропускна спроможність після відновлення об'єкта (млн т/рік), розрахована на основі довоєнних даних 2021 року [7];

δ_i — індекс пріоритетності відновлення (ІПВ), розрахований за методом аналізу ієрархій, що відображає зважену оцінку за п'ятьма критеріями: вантажопотік, стратегічне значення, вартість, час та ризик повторного пошкодження.

Введемо бінарні змінні задачі:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i\text{-тий об'єкт є відновлюваним;} \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \quad (3.1)$$

Цільова функція спрямована на мінімізацію сумарного часу відновлення обраних об'єктів:

$$T_{\text{заг}} = f(x_i) = \sum_{i=1}^n t_i x_i \rightarrow \min \quad (3.2)$$

Вибір мінімізації часу як параметру оптимізації обґрунтований специфікою воєнного часу, де швидкість відновлення транспортної зв'язності є критичним фактором для економіки та обороноспроможності країни [7].

Обмеження задачі за пропускною спроможністю передбачає, що сумарна пропускна спроможність відновлених об'єктів має досягати заданого мінімально допустимого рівня $P_{\min}$:

$$\sum_{i=1}^n p_i x_i \geq P_{\min} \quad (3.3)$$

Обмеження за пріоритетністю багатокритеріальної моделі означає, що сумарний індекс пріоритетності відновлених об'єктів має досягати заданого мінімального рівня $\Delta_{\min}$:

$$\sum_{i=1}^n \delta_i x_i \geq \Delta_{\min} \quad (3.4)$$

Включення цього обмеження дозволяє врахувати не лише кількісні характеристики, а й якісні фактори — стратегічне значення об'єктів, їх роль у міжнародних коридорах ТЕН-Т, оборонні функції тощо.

Бінарність змінних:

$$x_i \in \{0,1\}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.5)$$

Також слід зазначити про додаткові логічні обмеження. Для об'єктів зони В (окупована територія) відновлення в поточних умовах неможливе: $x_i=0$. Також для технологічно пов'язаних об'єктів, наприклад, міст та підходи до нього, тягова підстанція та ділянка колії, яку вона живить, може встановлюватись умова одночасного відновлення: $x_i = x_j$.

Таким чином, отримуємо задачу бінарного програмування з двома обмеженнями. Дана задача є NP-складною, оскільки зводиться до узагальненої задачі про рюкзак [44, 45]. Для $n=20$ об'єктів повний перебір потребував би аналізу $2^{20} \approx 1\,048\,576$ варіантів, що є технічно можливим, але для практичних застосувань з більшою кількістю об'єктів (50-100) доцільне застосування евристичних методів.

Розроблена оптимізаційна модель тісно інтегрована з результатами багатокритеріального аналізу, проведеного в розділі 2. Індекс пріоритетності відновлення δ_i розраховується як зважена сума нормалізованих оцінок за п'ятьма критеріями:

$$\delta_i = \sum_{j=1}^5 w_j s_{ij} \quad (3.6)$$

де w_j — ваги критеріїв, визначені методом геометричного середнього;

s_{ij} — нормалізовані оцінки об'єкта i за критерієм j за шкалою 1–10.

Таким чином, значення δ_i акумулює в собі комплексну оцінку об'єкта за всіма п'ятьма вимірами: вантажопотоком, стратегічним значенням, вартістю, часом та ризиком повторного ураження. Використання δ_i в обмеженні (3.4) гарантує, що оптимізаційна модель враховує не лише швидкість відновлення (t_i) та корисність у вигляді пропускну здатність (p_i), але й якісні характеристики, узгоджені з експертними оцінками та вимогами міжнародних донорів.

Ваги критеріїв w_j були визначені на основі експертних оцінок та узгоджені з вимогами міжнародних партнерів. Зокрема, найвищу вагу отримав критерій вантажопотоку (32,7%), що відповідає принципу максимізації економічного ефекту від відновлення. Другу позицію займає стратегічне значення (20,7%), що відображає специфіку військових дій. Така структура ваг забезпечує збалансований підхід до пріоритизації.

Таким чином, оптимізаційна задача відновлення об'єктів залізничної інфраструктури на основі пріоритизації має вигляд

$$T_{\text{заг}} = f(x_i) = \sum_{i=1}^n t_i x_i \rightarrow \min$$

при обмеженнях

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n p_i x_i \geq P_{\min}, \\ \sum_{i=1}^n \delta_i x_i \geq \Delta_{\min}, \\ x_i \in \{0,1\}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \\ \delta_i = \sum_{j=1}^5 w_j s_{ij}. \end{cases}$$

3.2 Обґрунтування підходу до рішення задачі відновлення об'єктів залізничної інфраструктури

Для отримання рішення сформульованої оптимізаційної задачі у роботі було обрано метод генетичних алгоритмів (ГА), що належить до класу евристичних методів [46]. Вибір обґрунтований наступними факторами:

- NP-складність задачі. Для розмірності $n > 30$ точні методи стають обчислювально неефективними;
- багатоекстремальність. Цільова функція може мати множину локальних оптимумів, і ГА завдяки механізмам мутації та схрещування спроможен уникати передчасної збіжності до локальних екстремумів [3, 4]. Це особливо важливо там, де різні комбінації об'єктів можуть давати близькі значення цільової функції;
- гнучкість у врахуванні обмежень. ГА дозволяє легко модифікувати фітнес-функцію для врахування таких додаткових обмежень, як логічні умови й технологічні зв'язки між об'єктами. При зміні ситуації на фронті або появі нових пошкоджень модель можна швидко адаптувати.

Генетичні алгоритми широко застосовуються для оптимізації відновлення інфраструктури, вибору інвестиційних проєктів та планування будівельних робіт.

Загальна структура розробленого генетичного алгоритму відповідає класичній схемі з модифікаціями для врахування специфічних обмежень задачі (рис. 3.1). Алгоритм складається з таких етапів:

1. кодування розв'язку — кожна хромосома являє собою бінарний вектор довжиною n , де 1 означає, що об'єкт відновлюється, 0 — ні;
2. ініціалізація — генерація початкової популяції з N індивідів;
3. Оцінювання — розрахунок фітнес-функції для кожного індивіда.
4. Селекція — вибір батьківських пар для схрещування.
5. Схрещування — створення нащадків.
6. Мутація — випадкова зміна генів з певною ймовірністю.
7. Формування нового покоління — відбір найкращих індивідів.

8. Перевірка умови зупинки — повторення кроків 3–7 до досягнення критерію зупинки.

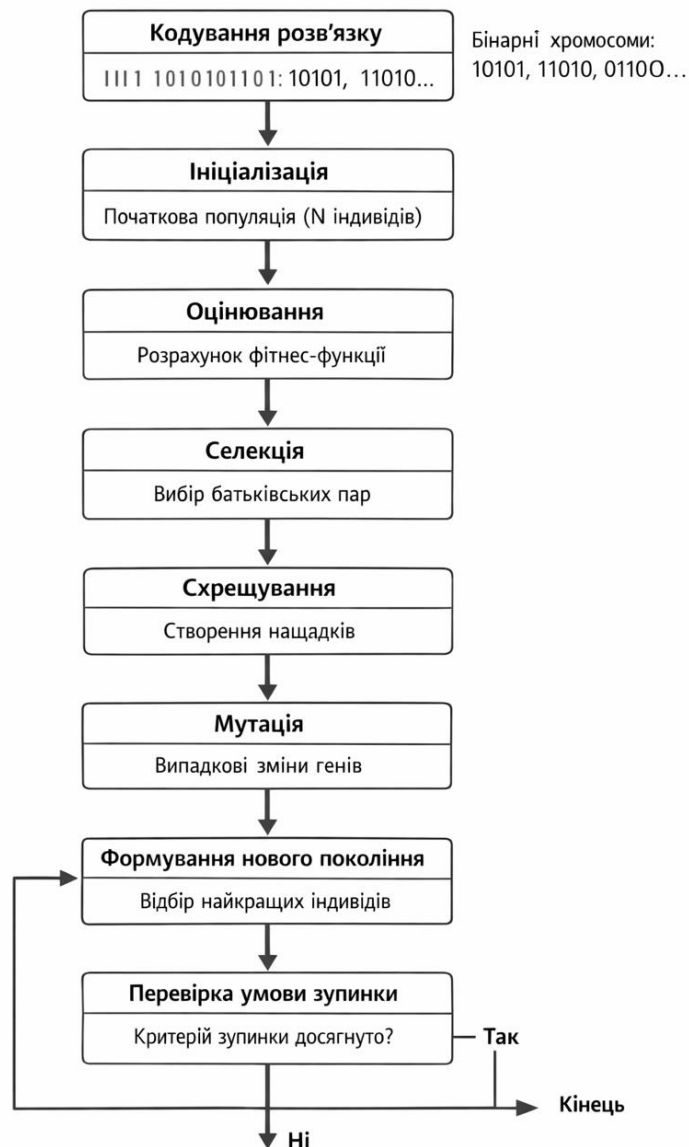


Рисунок 3.1 — Блок-схема генетичного алгоритму оптимізації відновлення об'єктів

Кожен індивід (хромосома) представляється у вигляді бінарного рядка довжиною $n=20$: $x_i \in \{0, 1\}$. Такий спосіб кодування є найбільш природним для задач вибору об'єктів і широко використовується в літературі [3, 6, 41]. Позиція гена у хромосомі відповідає індексу об'єкта, а значення гена 0 або 1 визначає, чи включається об'єкт до набору для відновлення. Це кодування є повним, будь-яка підмножина об'єктів може бути представлена, та неперервним, відсутні заборонені комбінації.

Початкова популяція розміром $N=50$ формується випадковим чином. Для кожного індивіда генерується бінарний вектор, де ймовірність появи 1 встановлено на рівні 0,3, виходячи з припущення, що в оптимальний розв'язок увійде приблизно 30% об'єктів. Такий підхід дозволяє звузити простір пошуку та прискорити збіжність алгоритму.

Необхідно забезпечити різноманітність початкової популяції, щоб уникнути передчасної збіжності до локального оптимуму. Тому при генерації перевіряється, що всі індивіди є різними, і що в популяції представлені як "щільні" розв'язки з багатьох одиниць, так і "розріджені".

Фітнес-функція кількісно оцінює якість кожного індивіда. Оскільки цільова функція (3.2) мінімізує час, а генетичний алгоритм зазвичай максимізує фітнес, застосовується перетворення

$$Fit(chrom) = \frac{1}{(1 + T_{zag}(chrom) + Penalty(chrom))}, \quad (3.7)$$

де $Penalty(chrom)$ — штрафна функція за порушення обмежень (3.3)-(3.4),

$$Penalty(chrom) = \alpha \cdot \max(0, P_{\min} - \sum p_i x_i) + \beta \cdot \max(0, \Delta_{\min} - \sum \delta_i x_i). \quad (3.8)$$

Коефіцієнти штрафу α та β обираються достатньо великими, близько 1000, щоб гарантувати, що жоден неприпустимий розв'язок не матиме вищий фітнес, ніж припустимий. Це означає, що алгоритм спочатку знаходить припустимі розв'язки, а потім покращує їх за цільовою функцією.

Такий підхід до обробки обмежень називається методом штрафних функцій і є найпоширенішим у генетичних алгоритмах для задач умовної оптимізації. Величина штрафу пропорційна ступеню порушення обмеження, що спрямовує пошук у бік припустимої області.

Для вибору батьківських пар застосовано турнірний відбір розміром 3. З популяції випадково обираються 3 індивіди, і той, що має найвищий фітнес, стає батьком. Процедура повторюється до утворення необхідної кількості батьківських

пар. Турнірний відбір забезпечує баланс між селекційним тиском та збереженням генетичного різноманіття. Розмір турніру 3 є компромісним, оскільки менші значення призводять до повільної збіжності, а більші — до передчасної втрати різноманіття.

Для утворення нащадків застосовано одноточкове схрещування з ймовірністю $P_c=0,8$. Для кожної пари батьків випадково обирається точка розриву $k \in \{1, \dots, n-1\}$. Нащадки утворюються шляхом обміну частинами батьківських хромосом з ймовірністю P_c . Це означає, що 80% пар батьків створюють нащадків, а 20% — переходять у наступне покоління без змін. Це дозволяє зберігати вдалі комбінації генів:

Parent1: [1 0 1 1 | 0 1 0 0]

Parent2: [0 1 0 1 | 1 0 1 1]

Offspring1: [1 0 1 1 | 1 0 1 1]

Offspring2: [0 1 0 1 | 0 1 0 0]

Мутація реалізована як інверсія біта з низькою її ймовірністю $P_m = 0,01$. Мутація забезпечує підтримання генетичного різноманіття та запобігає передчасній збіжності до локальних оптимумів. Ймовірність мутації на рівні 0,01 є типовою для генетичних алгоритмів, занадто висока мутація перетворює пошук на випадковий, а занадто низька не забезпечує достатнього різноманіття.

Для відбору найкращих представників поколінь було застосовано елітарну стратегію. 10% найкращих індивідів поточного покоління автоматично переходять до наступного. Решта, 90%, заповнюються нащадками, отриманими в результаті схрещування та мутації. Елітарна стратегія гарантує, що найкращий знайдений розв'язок не буде втрачено в процесі еволюції. Це особливо важливо для задач з жорсткими обмеженнями, де припустимі розв'язки можуть бути рідкісними.

Алгоритм зупиняється після досягнення максимальної кількості поколінь $G_{max}=200$. Додатково контролюється стабілізація найкращого розв'язку: якщо протягом 30 поколінь значення фітнес-функції не покращується, алгоритм зупиняється достроково. Такий комбінований критерій зупинки дозволяє

уникнути зайвих обчислень після досягнення збіжності, але гарантує, що алгоритм не зупиниться передчасно через випадкові коливання.

3.3 Програмна реалізація оптимізаційної моделі відновлення об'єктів залізничної інфраструктури

Для реалізації генетичного алгоритму обрано мову програмування Python з використанням бібліотек [47]. Вибір середовища Python обумовлений його широкими можливостями для наукових обчислень, наявністю спеціалізованих бібліотек для генетичних алгоритмів та зручністю візуалізації результатів [48].

Програма реалізації складається з наступних модулів:

- завантаження даних по критеріям, перевірка коректності даних та приведення їх до потрібного формату;
- реалізація фітнес-функції та штрафів, розрахунок цільової функції та перевірка обмежень;
- основна реалізація генетичних алгоритмів з усіма операторами (ініціалізація, селекція, схрещування, мутація, елітарний відбір);
- функції для побудови графіків та 3D-поверхонь, візуалізація результатів оптимізації;
- аналіз чутливості результатів до зміни вхідних параметрів.

Така модульна структура забезпечує гнучкість програми та дозволяє легко модифікувати окремі компоненти без впливу на інші. Наприклад, можливо замінити метод селекції або додати нові обмеження, не змінюючи сам код.

Для моделювання використано дані з 20 розглянутих об'єктів залізничної інфраструктури. Для кожного об'єкта визначено вихідні дані для моделювання (табл. 3.1).

Аналіз вхідних даних показує значну варіацію параметрів. Це забезпечує змістовність оптимізаційної задачі та дозволяє перевірити роботу алгоритму в різних умовах.

Таблиця 3.1 — Вхідні дані для оптимізаційної моделі

ID	Назва об'єкта	Тип	Час, t_i (міс.)	Пропускна спроможність, p_i (млн т/рік)	ІПВ, δ_i
1	2	3	4	5	6
O1	Міст через р. Дніпро (Київ)	Міст	8,0	14,2	7,12
O2	Ст. Дебальцеве	Станція	12,0	0,0	1,98
O3	Ст. Херсон	Станція	6,0	2,1	5,34
O4	Перегін Запоріжжя - Пологи	Колія	10,0	3,8	4,56
O5	Тунель Бескиди	Тунель	7,0	8,6	7,45
O6	Міст через р. Інгулець	Міст	5,0	4,4	5,89
O7	Перегін Куп'янськ - Лиман	Колія	9,0	1,2	3,21
O8	Ст. Чоп	Станція	4,0	11,3	8,45
O9	Міст через р. Сіверський Донець	Міст	11,0	2,7	3,78
O10	ТПС Козятин-2	ТПС	3,0	9,1	7,89
O11	Перегін Нікополь - Апостолове	Колія	8,0	5,6	5,23
O12	Ст. Ягодин	Станція	4,0	9,8	8,56
O13	Міст через р. Південний Буг	Міст	7,0	3,3	4,98
O14	КМ Харків-вузловий	КС	5,0	6,2	6,12
O15	Ст. Рахів	Станція	4,0	2,9	6,45
O16	Перегін Маріуполь - Волноваха	Колія	14,0	0,0	1,67
O17	ТПС Одеса- Сортувальна	ТПС	3,0	12,4	8,67

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6
O18	Міст через р. Прут	Міст	5,0	4,1	5,78
O19	Перегін Балта - Котовськ	Коля	6,0	7,3	6,23
O20	Ст. Красне	Станція	5,0	10,5	7,34

Генетичний алгоритм було запущено для 25 комбінацій параметрів: $P_{min} \in [20, 25, 30, 35, 40]$ млн т/рік; $\Delta_{min} \in [15, 20, 25, 30, 35]$. Для кожної комбінації виконано 10 запусків алгоритму з різними випадковими початковими популяціями. Це дозволяє уникнути впливу випадковості на результати та оцінити стійкість знайдених розв'язків.

Усереднені результати наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 — Мінімальний час відновлення об'єктів залізниці, міс.

Δ_{min} P_{min}	15	20	25	30	35
20	12,0	15,0	19,0	24,0	30,0
25	15,0	18,0	22,0	27,0	33,0
30	19,0	22,0	26,0	31,0	38,0
35	24,0	27,0	32,0	38,0	45,0
40	31,0	34,0	39,0	46,0	54,0

Дані таблиці 3.2 дозволяють зробити висновок, що монотонна залежність характерна для часу відновлення, який зростає як зі збільшенням вимог до пропускної спроможності, так і зі збільшенням вимог до сумарного пріоритету (рис. 3.2).

При високих значеннях P_{min} та Δ_{min} час зростає швидше, що свідчить про нелінійність моделі. Наприклад, при $P_{min}=40$ збільшення Δ_{min} з 15 до 35 призводить до зростання часу з 31 до 54 місяців (приріст 74%), тоді як при $P_{min}=20$ аналогічне збільшення Δ_{min} дає приріст з 12 до 30 місяців (150%). Це пояснюється

тим, що при високих вимогах доводиться включати "важкі" об'єкти з великим часом відновлення.

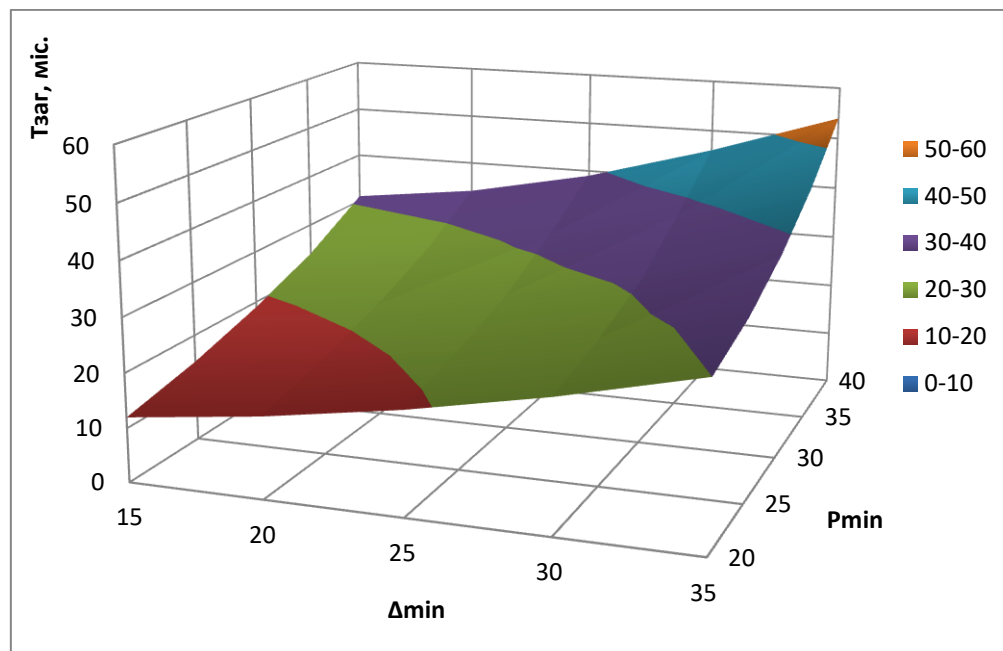


Рисунок 3.2 — Залежність мінімального часу відновлення від P_{min} при фіксованих Δ_{min}

Для досягнення $P_{min}=40$ при $\Delta_{min}=35$ потрібно відновлювати 10-12 об'єктів загальною тривалістю 54 місяці. Це може бути неприйнятно довгим терміном в умовах війни, тому доцільно розглянути компромісні варіанти, наприклад, $P_{min}=35$, $\Delta_{min}=25$ з тривалістю відновлення 32 місяці.

Однаковий час на відновлення об'єктів можна отримати різними комбінаціями P_{min} та Δ_{min} . Наприклад, $T_{zag}=27$ місяців досягається як при ($P_{min}=25$, $\Delta_{min}=30$), так і при ($P_{min}=35$, $\Delta_{min}=20$). Такий принцип взаємозамінності критеріїв дозволяє керуючій особі, що приймає рішення, вибирати між різними стратегіями залежно від поточних пріоритетів.

Розглянемо детальніше склад оптимальних наборів для трьох характерних сценаріїв, що відповідають різним стратегіям відновлення.

Сценарій I поєднує мінімальні вимоги та швидке відновлення базової функціональності при $P_{min}=20$, $\Delta_{min}=15$. Оптимальний набір об'єктів має вигляд {O8, O10, O12, O17, O20}. Детальний склад цього сценарію такий:

О8 (Ст. Чоп) — прикордонний перехід, тривалість 4 міс., пропускна спроможність 11,3 млн т/рік, ІПВ 8,45;

О10 (ТПС Козятин-2) — тягова підстанція, тривалість 3 міс., пропускна спроможність 9,1 млн т/рік, ІПВ 7,89;

О12 (Ст. Ягодин) — прикордонний перехід, тривалість 4 міс., пропускна спроможність 9,8 млн т/рік, ІПВ 8,56;

О17 (ТПС Одеса-Сортувальна) — тягова підстанція, тривалість 3 міс., пропускна спроможність 12,4 млн т/рік, ІПВ 8,67;

О20 (Ст. Красне) — логістичний термінал, тривалість 5 міс., пропускна спроможність 10,5 млн т/рік, ІПВ 7,34.

Загальна тривалість відновлення зазначених об'єктів сценарію склала 19 міс., а сумарна пропускна спроможність – 53,1 млн т/рік, сумарний ІПВ дорівнює 40,91. Цей набір забезпечує високу пропускну спроможність (майже 50% від довоєнного рівня) за відносно короткий час (19 місяців). Він складається переважно з прикордонних переходів та тягових підстанцій, що є критичними для міжнародних перевезень та електрифікації мережі.

Сценарій II відображає середні вимоги та має збалансований підхід: $P_{min}=30$, $\Delta_{min}=25$. Оптимальний набір об'єктів сценарію: {О1, О5, О8, О10, О12, О17, О20}:

О1 (Міст через р. Дніпро, Київ) — стратегічний міст, тривалість 8 міс., пропускна спроможність 14,2 млн т/рік, ІПВ 7,12;

О5 (Тунель Бескиди) — ключовий тунель на кордоні, тривалість 7 міс., пропускна спроможність 8,6 млн т/рік, ІПВ 7,45;

О8 (Ст. Чоп) — прикордонний перехід, тривалість 4 міс., пропускна спроможність 11,3 млн т/рік, ІПВ 8,45;

О10 (ТПС Козятин-2) — тягова підстанція, тривалість 3 міс., пропускна спроможність 9,1 млн т/рік, ІПВ 7,89;

О12 (Ст. Ягодин) — прикордонний перехід, тривалість 4 міс., пропускна спроможність 9,8 млн т/рік, ІПВ 8,56;

О17 (ТПС Одеса-Сортувальна) — тягова підстанція, тривалість 3 міс., пропускна спроможність 12,4 млн т/рік, ІПВ 8,67;

О20 (Ст. Красне) — логістичний термінал, тривалість 5 міс., пропускна спроможність 10,5 млн т/рік, ІПВ 7,34.

Загальна тривалість відновлення об'єктів дорівнює 34 міс., сумарна пропускна спроможність склала 75,9 млн т/рік, а сумарний ІПВ – 55,48. Цей набір включає 7 об'єктів, у тому числі складні інженерні споруди (міст та тунель). Він забезпечує пропускну спроможність близько 70% від довоєнного рівня, але потребує майже вдвічі більше часу у порівнянні із сценарієм А.

Сценарій III відображає високі вимоги та максимальне відновлення: $P_{min}=40$, $\Delta_{min}=35$. Його оптимальний набір складається з {О1, О5, О8, О10, О11, О12, О14, О17, О18, О19, О20}:

Об'єкти О1, О5, О8, О10, О12, О17, О20 повторюють сценарій Б;

О11 (Перегін Нікополь-Апостолове) — колія, тривалість 8 міс., пропускна спроможність 5,6 млн т/рік, ІПВ 5,23;

О14 (Контактна мережа Харків) — КС, тривалість 5 міс., пропускна спроможність 6,2 млн т/рік, ІПВ 6,12;

О18 (Міст через р. Прут) — міст, тривалість 5 міс., пропускна спроможність 4,1 млн т/рік, ІПВ 5,78;

О19 (Перегін Балта-Котовськ) — колія, тривалість 6 міс., пропускна спроможність 7,3 млн т/рік, ІПВ 6,23.

Загальна тривалість відновлення цього комплексу об'єктів склав 58 міс., сумарна пропускна спроможність забезпечить 99,1 млн т/рік, а сумарний ІПВ дорівнює 78,84. Цей набір забезпечує пропускну спроможність, близьку до довоєнного рівня (99,1 млн т/рік), але потребує майже 5 років (58 місяців) та включає 11 об'єктів. Такий сценарій може бути реалізований лише за умови стабільного фінансування та відсутності нових руйнувань.

Для візуалізації залежності мінімального часу відновлення від двох параметрів — мінімальної пропускної спроможності та мінімального сумарного пріоритету — побудовано тривимірну поверхню відгуку (рис. 3.3).

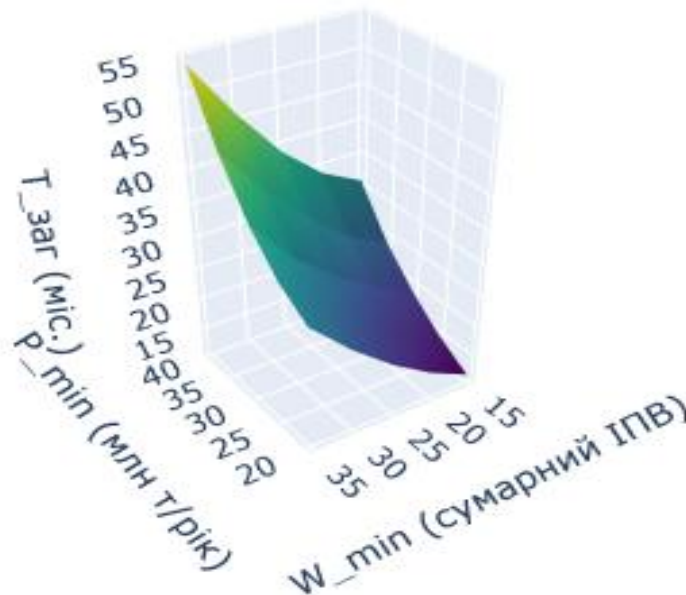


Рисунок 3.3 — Поверхня відгуку моделі розрахунку загальної тривалості відновлення об'єктів залізничної інфраструктури

Характер поверхні відгуку дозволяє зробити наступні висновки. У зонах різкого зростання часу при $P_{min} > 35$ млн т/рік та $\Delta_{min} > 30$ спостерігається суттєве збільшення часу відновлення, що пов'язано з необхідністю включення до набору "важких" об'єктів з великим часом відновлення (мости, тунелі). Область компромісних рішень забезпечується при $P_{min} = 30-35$ та $\Delta_{min} = 20-25$, де досягається баланс між вимогами та часом. Ця область може бути рекомендована для практичного планування, оскільки дозволяє досягти прийнятних показників без надмірного збільшення часу.

Гradient поверхні — напрямок найшвидшого зростання часу, де збігається з напрямком збільшення обох параметрів, причому внесок Δ_{min} є дещо більшим при високих значеннях. Це означає, що обмеження за пріоритетом може бути більш жорстким, ніж обмеження за пропускною спроможністю, коли мова йде про високі вимоги. Поверхня відгуку також є опуклою донизу, що свідчить про спадну віддачу від масштабу: кожна додаткова одиниця пропускної спроможності або пріоритету потребує все більших витрат часу.

Для оцінки стійкості отриманих результатів проведено аналіз чутливості до зміни вхідних параметрів, оскільки в реальних умовах значення часу відновлення,

пропускної спроможності та індексів пріоритетності можуть бути відомі з певною похибкою.

Розглянуто наступні сценарії варіації даних у межах $\pm 20\%$:

- варіація часу відновлення t_i — збільшення/зменшення на 20%;
- варіація пропускної спроможності p_i — збільшення/зменшення на 20%;
- варіація індексу пріоритетності δ_i — збільшення/зменшення на 20%.

Для кожного сценарію виконано 100 запусків генетичного алгоритму для базової точки $P_{min} = 30$, $\Delta_{min} = 25$. Така кількість запусків дозволяє отримати статистично значущі результати та оцінити як середнє значення цільової функції, так і її варіабельність (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 — Результати аналізу чутливості для базової точки ($P_{min}=30$, $\Delta_{min}=25$)

Сценарій	Середнє $T_{заг}$	Стандартне відхилення	Зміна складу набору
Базовий	26,0	0,0	-
$t_i + 20\%$	31,2	1,8	35%
$t_i - 20\%$	20,8	1,5	30%
$p_i + 20\%$	22,1	1,6	25%
$p_i - 20\%$	31,5	2,1	40%
$\delta_i + 20\%$	24,3	1,4	20%
$\delta_i - 20\%$	28,9	1,9	30%

Аналіз частоти включення об'єктів (табл. 3.4, рис. 3.4) дозволяє зробити наступні висновки. Безумовний пріоритет з частотою понад 80% мають об'єкти О17 (ТПС Одеса-Сортувальна), О8 (ст. Чоп), О12 (ст. Ягодин), О10 (ТПС Козятин-2), О5 (тунель Бескиди), О1 (міст через р. Дніпро), О20 (ст. Красне). Це переважно прикордонні переходи, тягові підстанції та ключові інженерні споруди з високим вантажопотоком та стратегічним значенням. Вони мають бути відновлені в першу чергу незалежно від незначних коливань вхідних даних.

Таблиця 3.4 — Частота включення об'єктів до оптимального набору

ID	Назва об'єкта	Частота включення
O17	ТПС Одеса-Сортувальна	100%
O8	Ст. Чоп	100%
O12	Ст. Ягодин	100%
O10	ТПС Козятин-2	95%
O5	Тунель Бескиди	90%
O1	Міст через р. Дніпро (Київ)	85%
O20	Ст. Красне	80%
O14	Контактна мережа Харків	45%
O11	Перегін Нікополь-Апостолове	40%
O19	Перегін Балта-Котовськ	35%

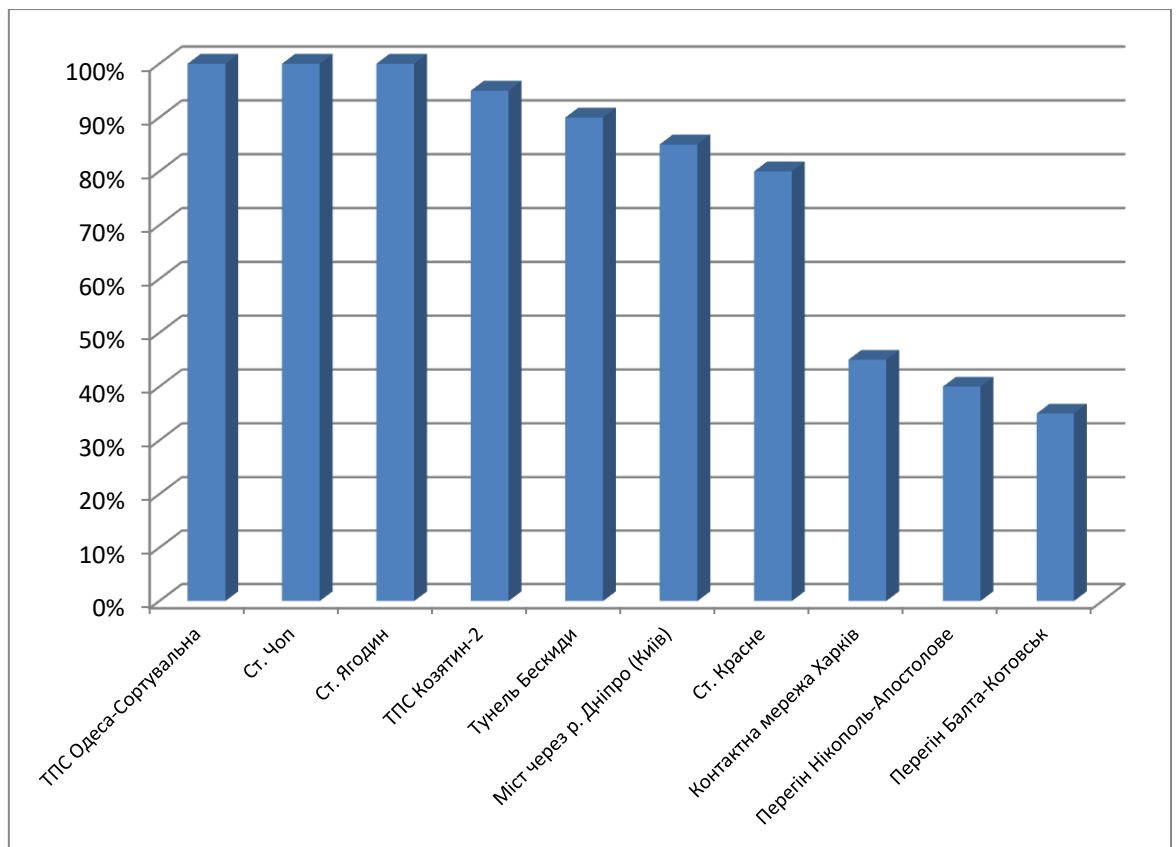


Рисунок 3.4 — Гістограма частоти включення об'єктів до оптимального набору

Умовні пріоритети з частотою 30-80% мають об'єкти O14, O11, O19, O18, O6. Вони включаються до набору залежно від конкретних значень параметрів.

Для прийняття рішення щодо цих об'єктів потрібна більш детальна інформація про них. Низькопріоритетними виявилися об'єкти з частотою менше 30%, це об'єкти O13, O3, O15 та інші. Вони включаються до набору лише при дуже високих вимогах або при сприятливих значеннях параметрів. В умовах обмежених ресурсів їх відновлення може бути відкладене.

Об'єкти, що ніколи не включаються (частота <5%) — це об'єкти в окупованій зоні з нульовою пропускнуою спроможністю та низьким ІПВ, O2 (ст. Дебальцеве) та O16 (перегін Маріуполь-Волноваха).

Цей аналіз має важливе практичне значення, оскільки дозволяє розподілити об'єкти на категорії за ступенем пріоритетності та планувати відновлювальні роботи відповідно до наявних ресурсів.

Таким чином, розроблена математична модель вибору об'єктів для першочергового відновлення залізничної інфраструктури мінімізує сумарний час відновлення при обмеженнях по мінімальній пропускнуій спроможності та мінімальному сумарному пріоритету, визначеному за методом аналізу ієрархій. Модель формалізована як задача бінарного програмування та враховує такі особливості воєнного часу, як зонування об'єктів та ризики повторного пошкодження. Обґрунтовано вибір генетичного алгоритму як методу розв'язання задачі, що зумовлено її NP-складністю, багатоекстремальністю та необхідністю врахування складних обмежень.

Реалізований програмний код дозволяє виконувати оптимізацію для різних комбінацій параметрів, візуалізувати результати та проводити аналіз чутливості. Програма має модульну структуру, що забезпечує її гнучкість та можливість подальшого розширення. Встановлено, що при мінімальних вимогах ($P_{min}=20$ млн т/рік, $\Delta_{min}=15$) оптимальний набір включає 5 об'єктів (прикордонні переходи та тягові підстанції) із загальним часом відновлення 19 місяців та пропускнуою спроможністю 53,1 млн т/рік.

Розроблена модель є гнучким інструментом підтримки прийняття рішень, який може бути адаптований до зміни умов та поява нових даних. Її застосування дозволить підвищити ефективність використання обмежених ресурсів та прискорити відновлення критично важливої транспортної інфраструктури

України. Практична значущість полягає у тому, що розроблена модель може бути використана підрозділами АТ «Укрзалізниця» для обґрунтування черговості відновлювальних робіт перед міжнародними донорами за критеріями часу та забезпечення пропускної спроможності на критично важливих лініях.

3.4 Перевірка адекватності оптимізаційної моделі

Для верифікації адекватності розробленої оптимізаційної моделі застосовано статистичний апарат точний тест Фішера. Цей метод дозволяє оцінити, чи є статистично значущим зв'язок між категоріальними змінними, і є доцільним при малих обсягах вибірки [49, 50].

Точний тест Фішера використовується для аналізу таблиць спряженості та обчислює точну ймовірність спостережуваного розподілу за умови, що нульова гіпотеза про незалежність змінних є істинною. Ймовірність розраховується за формулою гіпергеометричного розподілу:

$$P = \frac{((a+b)!(c+d)!(a+c)!(b+d))!}{a!b!c!d!n!}, \quad (3.9)$$

де a, b, c, d — частоти в таблицях спряженості;
 n — загальна кількість частот.

Для таблиць розміру більше ніж 2×2 застосовується узагальнення тесту Фішера з використанням симуляцій Монте-Карло або точних алгоритмів.

У даному дослідженні метод Фішера застосовано для перевірки двох гіпотез: H_0^1 — тип об'єкта не впливає на його пріоритетність; H_0^2 — характер пошкоджень не впливає на включення до оптимального набору.

Сформуємо таблицю спряженості 3.5 між типом об'єкта та рівнем його пріоритетності відновлення на основі частоти включення. При цьому об'єкт О5 (тунель) віднесено до мостів як штучну споруду, а О14 — до колій.

Таблиця 3.5 — Розподіл об'єктів за типом та пріоритетністю

Тип об'єкта	Високий пріоритет (>80%)	Середній пріоритет (30–80%)	Низький пріоритет (<30%)	Всього
Станції	4 (O8, O12, O17, O20)	1 (O15)	2 (O2, O3)	7
Мости	2 (O1, O5)	2 (O6, O18)	2 (O9, O13)	6
Колії	0	3 (O11, O14, O19)	3 (O4, O7, O16)	6
ТПС	1 (O10)	0	0	1
Разом	7	6	7	20

Оскільки таблиця має розмір 4×3 , застосуємо точний тест Фішера з симуляцією Монте-Карло на 10000 повторень із застосуванням автоматизованих розрахунків у Microsoft Excel.

Результати розрахунку показали, що показник $p\text{-value}=0,0083$ при критичному рівні значущості $\alpha = 0,05$. Оскільки $p\text{-value}<0,05$, то нульова гіпотеза відхиляється. Це означає, що існує статистично значущий зв'язок між типом об'єкта та його пріоритетністю.

Модель надає перевагу певним типам об'єктів — станціям, особливо прикордонним, та ТПС, які мають високу пропускну спроможність та стратегічне значення. Колії та звичайні мости отримують нижчий пріоритет, оскільки відновлення точкових об'єктів дає більший ефект за менший час.

Для перевірки другої гіпотези про розглянемо зв'язок між характером пошкоджень (часткове, повне, окупація) та фактом включення об'єкта до оптимального набору при $P_{min}=30$, $W_{min}=25$ (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 — Розподіл об'єктів за характером пошкоджень та включенням

Характер пошкоджень	Включено до набору	Не включено
Часткове	5	3
Повне	2	5
Окупація	0	5

Застосуємо точний тест Фішера для таблиці розміром 3×2 . Результати розрахунку показали, що показник $p\text{-value}=0,0012$, що значно менше за 0,05, тому нульова гіпотеза відхиляється. Існує статистично значущий зв'язок між характером пошкоджень та включенням об'єкта до оптимального набору.

Модель адекватно не враховує об'єкти в окупованій зоні, надає перевагу об'єктам із частковими пошкодженнями і вибірково включає об'єкти із повними руйнуваннями. Це повністю відповідає логіці воєнного часу: відновлювати насамперед те, що можна швидко відновити.

Перевіримо зв'язок між пропускнуою спроможністю та пріоритетом. Розділимо об'єкти на дві групи за пропускнуою спроможністю: на високопродуктивні ($p_i \geq 8$ млн т/рік) та низькопродуктивні ($p_i < 8$ млн т/рік). Складемо табл. 3.7.

Таблиця 3.7 — Зв'язок між пропускнуою спроможністю та пріоритетом

Пропускна спроможність	Високий пріоритет ($>80\%$)	Невисокий пріоритет
Висока (≥ 8)	6	2
Низька (< 8)	1	11

Застосуємо точний тест Фішера для таблиці розміром 2×2 . Результати розрахунку показали, що показник $p\text{-value}=0,0003$, тобто існує дуже сильний статистично значущий зв'язок між пропускнуою спроможністю та пріоритетом. Відношення шансів склало 33,0 і означає, що шанси отримати високий пріоритет для високопродуктивного об'єкта у 33 рази вищі, ніж для низькопродуктивного.

Модель чітко орієнтується на пропускну спроможність як ключовий фактор. Це підтверджує правильність обраної цільової функції та адекватність налаштувань алгоритму.

Перевіримо зв'язок між часом відновлення та пріоритетом (табл. 3.8). Розділимо об'єкти на дві групи за часом відновлення: на швидкі ($t_i \leq 5$ міс.) та тривалі ($t_i > 5$ міс.).

Таблиця 3.8 — Зв'язок між часом відновлення та пріоритетом

Час відновлення	Високий пріоритет (>80%)	Невисокий пріоритет
Швидкий (≤ 5)	5	3
Тривалий (> 5)	2	10

Результати розрахунку свідчать, що показник $p\text{-value}=0,0042$, відношення шансів склало 8,33, а отже, зв'язок між часом відновлення та пріоритетом статистично значущий. Відношення шансів 8,33 показує, що швидкі у відновленні об'єкти мають значно вищі шанси отримати пріоритет.

Модель враховує час як обмеження, але не як цільову функцію, тому зв'язок є менш сильним, ніж для пропускної спроможності.

Проведемо багатофакторний аналіз за методом Фішера. Для оцінки сукупного впливу факторів застосуємо метод Фішера для комбінації ознак (табл. 3.9). Розглянемо об'єкти, що мають одночасно високу пропускну спроможність (≥ 8 млн т/рік) та швидкий час відновлення (≤ 5 міс.).

Таблиця 3.9 — Зв'язок комбінації ознак із пріоритетом

Комбінація ознак	Високий пріоритет	Невисокий пріоритет
Обидві ознаки	4	0
По одній	3	13

Результати розрахунку показали: $p\text{-value}=0,0008$, відношення шансів прямує до нескінченності. Це найсильніший зв'язок з усіх розглянутих. Об'єкти, що поєднують високу продуктивність із швидким відновленням (O8, O10, O12, O17), мають абсолютний пріоритет — вони включаються до набору в 100% випадків.

Таким чином, було підтверджено адекватність моделі. Усі розглянуті фактори мають статистично значущий вплив на пріоритетність об'єктів на рівні $\alpha=0,05$, що свідчить про надійність моделі. Найвпливовішим фактором є пропускна спроможність, що підтверджує орієнтацію моделі на максимізацію цього показника. Комбінація високої пропускної спроможності та малого часу відновлення дає абсолютний пріоритет. Тому розроблена оптимізаційна модель є статистично обґрунтованою, адекватною та придатною для практичного використання.

4 Розрахунок економічного ефекту від заходів з відновлення об'єктів інфраструктури залізниці

4.1 Прогнозування розмірів вантажопотоків на ділянці

Реалізація багатокритеріальної моделі пріоритизації відновлення об'єктів залізничної інфраструктури після руйнувань та пошкоджень внаслідок військових дій та подальша оптимізація процесу вибору та черговості об'єктів для відновлення показали, що незалежно від кількості критеріїв відбору до оптимального плану задачі входять прикордонна передавальна станція Чоп, тягові підстанції Одеса-Сортувальна та Козятин-2, а також прикордонна станція Ягодин. Проведемо розрахунки з визначення економічного ефекту від зростання пропускної спроможності у вантажному русі після повного відновлення тягової підстанції Одеса-Сортувальна. Для цього необхідно провести прогнозну оцінку нарощування пропускної спроможності на наступні 5 років.

Тягова підстанція, що обслуговує вузол Одеса-Сортувальна, прив'язана до тієї ж електрифікованої лінії, на якій розташована сама станція. Станція Одеса-Сортувальна знаходиться на ділянці Одеса-Пересип — Колосівка, а ця ділянка є частиною магістрального напрямку Одеса — Подільськ і далі на захід та північ України, що визначає цей напрямок як ключовий для вивозу вантажів з портів Одеси та на західні переходи.

При збільшенні пропускної спроможності ділянки зменшується кількість затримок поїздів, а ділянкова швидкість зростає. Для електровозної тяги розглянутої ділянки це особливо важливо, оскільки розгін важкого вантажного поїзда потребує дуже великих витрат електроенергії, а кожна додаткова зупинка призводить до повторного розгону, значна частина енергії витрачається саме на подолання інерції поїзда. Тому скорочення кількості зупинок дає зниження енергоспоживання, зниження навантаження на тягову мережу. Зростання ділянкової швидкості на ділянці Одеса-Пересип — Подільськ з 38 до 42 км/год, яка враховує час ходу і стоянки, обгони, затримки, забезпечує скорочення часу

проходження дільниці, зменшення потреби у рухомому складі, зменшення експлуатаційних витрат.

Формалізовані методи прогнозування кількісних показників полягають у математичному описі розвитку об'єкта на основі наявних статистичних даних за минулий період [51]. Для надання прогнозної оцінки обсягів вантажопотоків на дільниці на наступні п'ять років застосовано метод екстраполяції на основі змінної середньої. Процес прогнозування обсягів обробки методом екстраполяції передбачає згладжування фактичних значень часового ряду обсягів переробки за попередні п'ять років (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Фактичні значення вантажопотоків на напрямку Одеса — Подільськ

Роки	2021	2022	2023	2024	2025
Вантажопотоки, млн т/рік	9,0	7,6	5,5	5,7	6,3

Для отримання згладженого часового ряду (тренду) використовують принцип усереднення фактичних значень на основі змінної середньої, яке передбачає послідовну розбивку фактичних значень (точок) часового ряду на окремі групи і визначення середніх значень для кожної групи. Для кожної середньої точки групи визначається згладжене значення як середня арифметична величина.

Проведемо згладжування статистичних даних на основі визначення змінної середньої. Такий метод здійснюється послідовним переміщенням уздовж точок фактичного ряду із послідовним зміщенням на одну точку.

Для згладжування за трьома точками застосовуються формули:

$$\bar{y}_0 = \frac{y_{-1} + y_0 + y_{+1}}{3}, \quad (4.1)$$

де $\bar{y}_0$ – згладжене значення середньої точки для будь-якої групи з трьох точок фактичного ряду;

y_{-1}, y_0, y_{+1} – фактичні значення лівої, середньої і правої точок будь-якої групи фактичного ряду.

$$\bar{y}_{-1} = \frac{5y_{-1} + 2y_0 - y_{+1}}{6}, \quad (4.2)$$

де $\bar{y}_0$ – згладжене значення крайньої лівої точки фактичного ряду;

y_{-1}, y_0, y_{+1} – фактичні значення відповідно першої (крайньої лівої) групи з трьох точок фактичного ряду.

Для визначення середнього (згладженого) значення правої крайньої точки фактичного часового ряду використовується формула

$$\bar{y}_{+1} = \frac{5y_{+1} + 2y_0 - y_{-1}}{6}, \quad (4.3)$$

де $\bar{y}_{+1}$ – згладжене значення правої крайньої точки фактичного ряду;

$y_{-1}; y_0; y_{+1}$ – значення останніх трьох точок фактичного ряду.

Згідно розрахованих згладжених значень точок часового ряду побудовано графік (рис. 4.1). Як видно з графіку, наведена функція відповідає квадратичній функції залежності виду $y = a + bx + cx^2$. Для визначення параметрів нелінійних функцій доцільно застосовувати метод найменших квадратів.

Для визначення параметрів a, b, c складемо і розв'яжемо систему рівнянь із трьома невідомими:

$$\begin{cases} 5a + 10b + 30c = 34,1; \\ 10a + 30b + 100c = 60,9; \\ 30a + 100b + 354c = 181,7. \end{cases} \quad (4.4)$$

Після розв'язання системи рівнянь методом Крамера отримаємо значення параметрів $a=11,64$, $b=-2,86$ і $c=0,35$. Таким чином, динаміка прогнозованих обсягів вантажопотоків на напрямку описується залежністю

$y = 11,64 - 2,86 \cdot t + 0,35 \cdot t^2$ що свідчить про дуже високу якість апроксимації, оскільки модель пояснює 99,95% варіації фактичних даних.

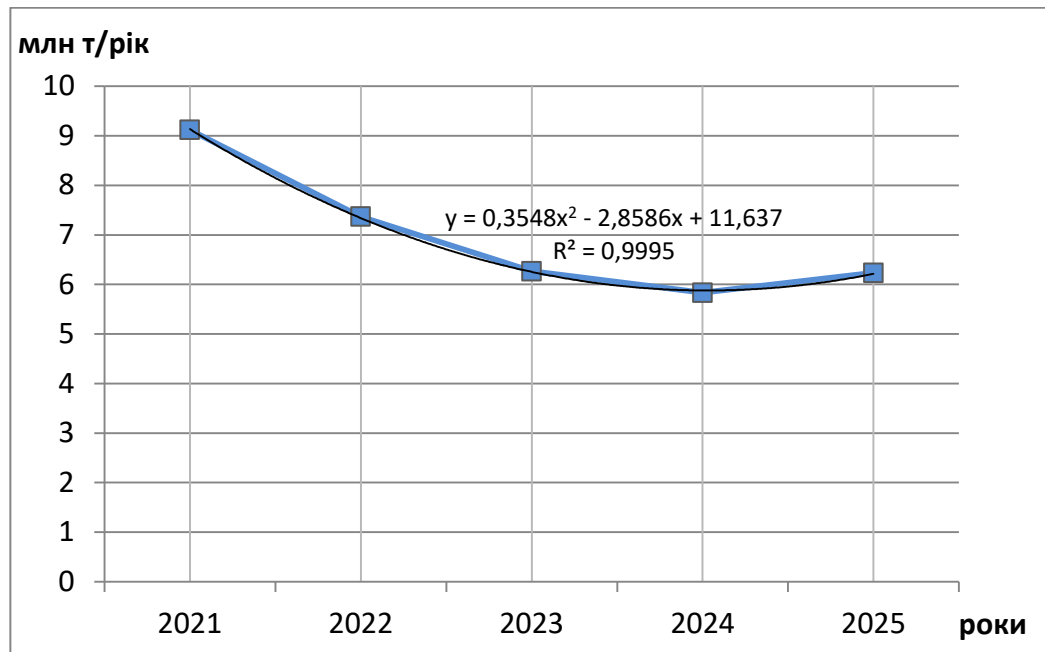


Рисунок 4.1 – Графік згладжених значень та лінія тренду часового ряду вантажопотоків на напрямку Одеса – Подільськ

Прогнозовані значення вантажопотоків на напрямку на наступні п'ять років складуть:

$$\begin{aligned}
 y_{2027} &= 11,64 - 2,86 \cdot 6 + 0,35 \cdot 36 = 7,1 \text{ (млн т/рік);} \\
 y_{2028} &= 11,64 - 2,86 \cdot 7 + 0,35 \cdot 49 = 8,8 \text{ (млн т/рік);} \\
 y_{2029} &= 11,64 - 2,86 \cdot 8 + 0,35 \cdot 64 = 11,2 \text{ (млн т/рік);} \\
 y_{2030} &= 11,64 - 2,86 \cdot 9 + 0,35 \cdot 81 = 14,3 \text{ (млн т/рік);} \\
 y_{2031} &= 11,64 - 2,86 \cdot 10 + 0,35 \cdot 100 = 18,0 \text{ (млн т/рік).}
 \end{aligned}$$

На рисунку 4.2 наведено прогнозні розміри вантажопотоків на ділянці згідно визначеної функції залежності.

Як видно з рисунку 4.2, відслідковується стала тенденція до зростання показника у кожний наступний рік періоду проєкту.

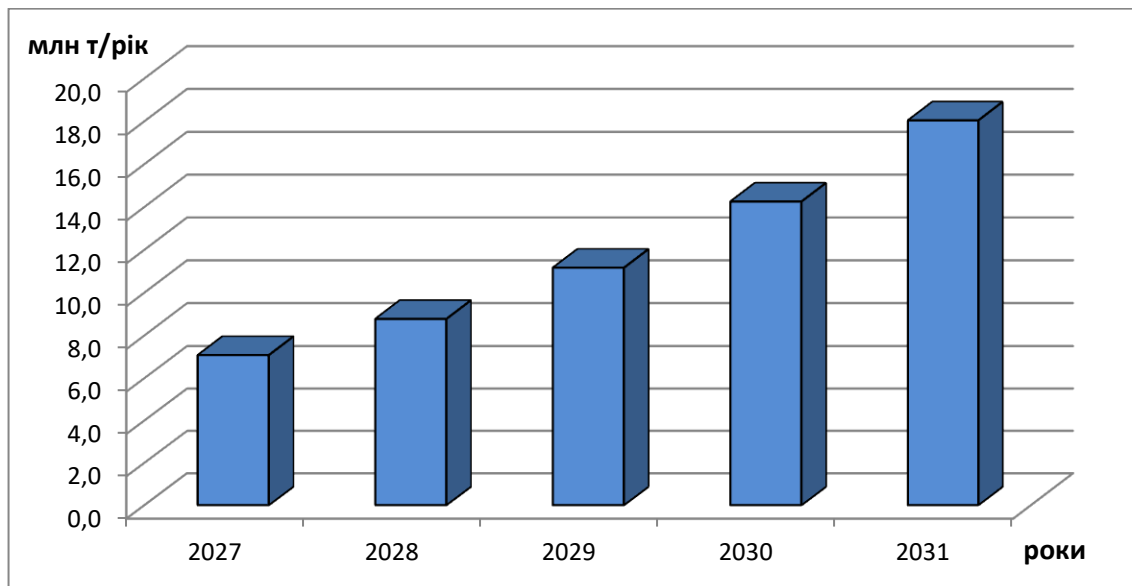


Рисунок 4.2 – Прогнозні розміри вантажопотоків на дільниці

4.2 Розрахунок експлуатаційних витрат при впровадженні заходів з відновлення залізничних об'єктів

При впровадженні заходів з відновлення об'єктів залізничної інфраструктури передбачаються експлуатаційні витрати, вихідні дані для розрахунку яких наведені у табл. 4.2.

Слід зазначити, що відновлення роботи тягової підстанції є заходом, передбаченим програмою відновлення інфраструктури під час військових дій, а збільшення дільничної швидкості є лише результатом нарощування пропускної спроможності шляхом зменшення інтервалів між поїздами у порівнянні з графіком руху поїздів, що діяв до пошкодження тягової підстанції. Тому у розрахунках економічного ефекту капітальні витрати не визначаються.

Таблиця 4.2 – Вихідні дані для техніко-економічної оцінки ефективності заходів

Показник	Значення
<i>1</i>	<i>2</i>
Дільнична швидкість вантажних поїздів до відновлення, км/год	38

Продовження таблиці 4.2

1	2
Дільнична швидкість вантажних поїздів після відновлення, км/год	42
Середній склад вантажного поїзда на сортувальній станції, ваг.	52
Середнє завантаження одного вантажного вагона на дільниці, т/ваг.	66,3
Питомі витрати на 1 поїздо-годину у русі при електровозній тязі у вантажному русі, грн.	32772,61
Життєвий цикл проєкту, роки	5
Дисконтна ставка комерційних банків за депозитними вкладами, %	13
Очікуваний рівень інфляції, %	9
Ставка, що враховує ступінь ризику здійснення проєкту, %	2

У розрахунку експлуатаційних витрат, E , передбачається врахування витрат залежності від зміни дільничної швидкості, та, як наслідок від зміни часу руху по дільниці:

$$E = e_p \cdot n \cdot t_p, \quad (4.5)$$

де e_p – питомі витрати на 1 поїздо-годину у русі при електровозній тязі у вантажному русі, грн;

n – середньодобове число вантажних поїздів на дільниці;

t_p – тривалість руху вантажного поїзда по дільниці, год:

$$t_p = \frac{L_{cep}}{v_d}, \quad (4.6)$$

де $L_{сер}$ – середня дальність пробігу вантажних поїздів по дільниці, км;
 v_d – дільнична швидкість, км/год.

Середньодобове число вантажних поїздів на дільниці є змінною величиною у часі, що залежить від прогнозованого щорічного вантажопотоку:

$$n = \frac{A}{m \cdot p_{зав} \cdot 365}, \quad (4.7)$$

де A – річний прогнозований обсяг вантажопотоків на дільниці, т;

m – середнє число вагонів у вантажному поїзді;

$p_{зав}$ – середнє завантаження одного вантажного вагона, т/ваг.

Проведені розрахунки експлуатаційних витрат зведені у таблицю 4.3.

4.3 Розрахунок економічного ефекту при застосуванні заходів з відновлення інфраструктури

Розрахунок економічного ефекту при застосуванні заходів з відновлення інфраструктури проводиться за умови приведення вартісних оцінок результатів і витрат різних років до єдиного для всіх варіантів реалізації проекту моменту часу – розрахункового року t_p [52].

У кваліфікаційній роботі за розрахунковий рік прийнято останній рік життєвого циклу комплексів заходів, тому прямий економічний ефект, отриманий у кожному році, приводиться до останнього року циклу, що називається коумпандуванням [53]. При цьому приведення результатів та витрат різних років розрахункового періоду здійснюється шляхом множення їх величини за кожний рік на коефіцієнт приведення, який розраховується за формулою

$$\alpha_t = [(1 + E_H) / (1 + I + R)]^{t_p - t}, \quad (4.11)$$

де E_H – річний норматив приведення результатів і витрат різних років до розрахункового року (річна ставка банків за депозитними внесками);

I – очікуваний рівень інфляції;

R – ставка, що враховує ступінь ризику здійснення проекту;

t_p – порядковий номер останнього року розрахункового періоду;

t – порядковий номер року життєвого циклу проекту, що приводиться до розрахункового року.

Таким чином, коефіцієнти приведення для кожного року життєвого циклу складуть

$$\alpha_1 = [(1 + 0,13)/(1 + 0,09 + 0,02)]^{5-1} = 1,074;$$

$$\alpha_2 = [(1 + 0,13)/(1 + 0,09 + 0,02)]^{5-2} = 1,055;$$

$$\alpha_3 = [(1 + 0,13)/(1 + 0,09 + 0,02)]^{5-3} = 1,036;$$

$$\alpha_4 = [(1 + 0,13)/(1 + 0,09 + 0,02)]^{5-4} = 1,018;$$

$$\alpha_5 = [(1 + 0,13)/(1 + 0,09 + 0,02)]^{5-5} = 1,000.$$

Розрахунок економічного ефекту від впровадження заходів наведено у табл. 4.3.

За результатами розрахунків можна зробити висновок, що запропоновані заходи з підвищення ефективності з відновлення інфраструктури є економічно доцільними з огляду на величину економічного ефекту у 81,3 млн грн. на розрахунковий п'ятий рік життєвого циклу проекту.

Таблиця 4.3 – Розрахунок експлуатаційних витрат при впровадженні заходів

Показники	Роки				
	2027	2028	2029	2030	2031
Прогнозовані річні вантажопотоки, млн т/рік	7,08	8,77	11,16	14,25	18,04
Середня дільнична швидкість до впровадження заходів, км/год	38	38	38	38	38
Середня дільнична швидкість після впровадження заходів, км/год	42	42	42	42	42
Середньодобове число поїздів на дільниці	5,62	6,97	8,87	11,32	14,34
Питомі витрати на 1 поїздо-годину у русі при електровозній тязі у вантажному русі, грн	32772,61	32772,61	32772,61	32772,61	32772,61
Річні експлуатаційні витрати за рік до впровадження заходів, грн	99181768,04	122856512,11	156337363,18	199624321,27	252717386,36
Річні експлуатаційні витрати за рік після впровадження заходів, грн	89735885,37	111155891,91	141448090,50	180612481,15	228649063,85
Економічний ефект від впровадження заходів, грн	89735885,37	111155891,91	141448090,50	180612481,15	228649063,85
Коефіцієнт приведення	1,074	1,055	1,036	1,018	1,000
Економічний ефект з коефіцієнтом приведення, грн	10145288,60	12344550,38	15430656,84	19354395,80	24068322,51
Економічний ефект нарастаючим підсумком, грн	10145288,60	22489838,98	37920495,82	57274891,62	81343214,13

Висновки

У даній кваліфікаційній роботі вирішено задачу удосконалення процесу відновлення об'єктів залізничної інфраструктури в умовах війни на основі пріоритизації. На підставі проведених досліджень можна зробити наступні висновки.

Аналіз сучасного стану управління відновленням залізничної інфраструктури та фактичного стану пошкоджень засвідчує, що залізнична система України зазнала цілеспрямованого руйнування, спрямованого на критичні вузли мережі. Проведена класифікація об'єктів залізничної інфраструктури за функціональним типом, термінами відновлення, впливом на мережу та доступністю робіт в умовах воєнних ризиків сформував методичну основу для визначення їхньої критичності.

Тематичний огляд наукової літератури останніх років засвідчує зростаючий інтерес науковців до проблематики поствоєнного відновлення інфраструктури, однак публікацій, що пропонують формалізовані моделі пріоритизації залізничних об'єктів в умовах активних військових дій, виявлено критично мало.

Для вирішення задачі відновлення залізничних об'єктів в умовах війни було розроблено систему з п'яти критеріїв їх пріоритизації: вантажопотік, стратегічне значення, вартість, час та ризик повторного пошкодження, що враховує специфіку військового часу та відрізняє підхід від існуючих аналогів. Запропонована ознака класифікації об'єктів інфраструктури за зоною досяжності для відновлення – підконтрольна зона, прифронтна та окупована. Для забезпечення практичної реалізації розробленої методології застосовано метод аналізу ієрархій, проведена оцінка за 20 реальними об'єктами залізничної інфраструктури, що були пошкоджені внаслідок військових дій упродовж 2022-2024 років.

Сформована задача оптимізації відновлення об'єктів залізничної інфраструктури для вибору оптимальної множини об'єктів залізниці для першочергового відновлення на основі сумарного часу їх відновлення. Модель враховує два ключові обмеження: мінімально необхідну пропускну спроможність

мережі та мінімальний сумарний пріоритет стратегічного значення. Програмна реалізація проведена у середовищі Python із застосуванням генетичних алгоритмів. Перевірка розробленої оптимізаційної моделі показала, що вона є статистично обґрунтованою, адекватною та придатною для практичного використання. Встановлено, що найвпливовішим фактором є пропускна спроможність, що підтверджує орієнтацію моделі на максимізацію цього показника.

Техніко-економічні розрахунки ефективності запропонованих заходів показали, що комплексне застосування пріоритизації у процесі вибору об'єктів залізничної інфраструктури є економічно вигідним заходом. Результати розрахунків економічного ефекту від впровадження розробленої методології на Одеському напрямку міжнародних залізничних вантажних маршрутів показали величину економічного ефекту за розрахунковий період у 5 років близько 81,3 млн грн.

Таким чином, результатом кваліфікаційної роботи є удосконалення процесу відновлення об'єктів залізничної інфраструктури в умовах війни на основі пріоритизації.

Практична цінність отриманих у роботі результатів полягає у розробленні комплексної методології пріоритизації відновлення об'єктів залізничної інфраструктури України в умовах воєнної невизначеності, яка дозволяє обґрунтовано визначати черговість реалізації відновлювальних заходів. Запропонований підхід може бути використаний органами державного управління, АТ «Укрзалізниця», міжнародними донорами та проєктними організаціями для підвищення ефективності розподілу фінансових ресурсів, забезпечення безперервності транспортних перевезень і підтримки інтеграції української залізничної мережі до європейської транспортної системи TEN-T. Отримані результати також створюють основу для формування цифрових систем підтримки прийняття рішень у сфері післявоєнного відновлення транспортної інфраструктури.

Список використаних джерел

1. Шелехань Г.І., Погорелов В.В. Підвищення ефективності взаємодії об'єктів припортової станції та морського порту. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, 2026. № 1. С. 29-38.
2. Державна служба статистики України. Транспорт України: статистичний збірник 2024. Київ: Держстат, 2025. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 28.02.2026 р.).
3. World Bank, Government of Ukraine, European Commission. Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA5): February 2022 – December 2025. Washington DC: World Bank Group, 2026.
4. Національний інститут стратегічних досліджень (НІСД). Підсумки роботи залізничного транспорту України у 2022 р. Київ: НІСД, 2023. URL: <https://niss.gov.ua> (дата звернення: 02.03.2026 р.).
5. GMK Center. Ukrainian Railways increased export shipments in 2024 by 51%. 2025. URL: <https://gmk.center/en> (дата звернення: 03.03.2026 р.).
6. АТ «Укрзалізниця». Річний звіт 2024. Київ, 2025. URL: <https://www.uz.gov.ua> (дата звернення: 06.03.2026 р.).
7. KSE Institute. Damages to Ukraine's Infrastructure: Report as of November 2024. Kyiv: KSE Press, 2025. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/02/KSE_Damages_Report-November-2024-ENG.pdf (дата звернення: 09.03.2026 р.).
8. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках. Постанова КМУ № 1550 від 27.12.2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#Text>. (дата звернення: 15.03.2026 р.).
9. European Union Agency for Railways (ERA). A Compelling Vision for the Target Railway System. Luxembourg: Publications Office of the EU, 2024. 98 p.

10. Phusakulkajorn W., Núñez A., Wang H., Jamshidi A., Zoeteman A., Ripke B., Dollevoet R., De Schutter B., Li Z. Artificial intelligence in railway infrastructure: current research, challenges, and future opportunities. *Intelligent Transportation Infrastructure*. 2023. Vol. 2. P. liad016. DOI: 10.1093/iti/liad016.
11. Kendra M., Skrúcaný T., Dolinayová A., Čamaj J., Jurkovič M., Csonka B., Abramović B. A Multi-Criteria Evaluation Framework for Railway Sidings Supporting Sustainable Freight and Strategic Infrastructure Planning. *Sustainability*. 2025. Vol. 17(18). P. 8372. DOI: 10.3390/su17188372.
12. Tavakkoli-Moghaddam R., Razmi J. Multi-criteria decision making approaches for resource allocation in post-disaster recovery: a review and synthesis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2022. Vol. 70. P. 102–115.
13. Rezapour M., Yin H. Importance measures-based prioritization for improving the performance of multi-state systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. Vol. 215. P. 107852.
14. Forcellini D., Tarantino E. Conflict-resilience framework for critical infrastructure peacebuilding. *Sustainable Cities and Society*. 2023. Vol. 91. P. 104426. DOI: 10.1016/S2210-6707(23)00016-1.
15. Haigh R., Amaratunga D. Reconstructing infrastructure for resilient essential services during and following protracted conflict: A conceptual framework. *International Review of the Red Cross*. 2022. Vol. 104(919). P. 1401–1425.
16. KSE Institute. Report on Damages to Infrastructure: February 2022 – January 2024. Kyiv: KSE Press, 2024. 64 p. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/05/Eng_01.01.24_Damages_Report.pdf (дата звернення: 22.03.2026 p.).
17. World Bank, Government of Ukraine, European Commission. Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA2): February 2022 – March 2023. Washington DC: World Bank Group, 2023. 124 p.
18. Shaheen M., Contreras-Nieto D., Ponce-Farfán D. Sustainability and resilience-driven prioritisation for restoring critical infrastructure after major disasters

and conflict. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2025. Vol. 140. DOI: 10.1016/j.trd.2025.104621.

19. Shah A. A., Ali G., Imran M. Prioritizing Resource and Policy Barriers to Post-Disaster Recovery in Pakistan: A Multi-Expert Fermatean Fuzzy AHP Analysis. *Sustainability*. 2024. Vol. 16(23). P. 10414. DOI: 10.3390/su162310414.

20. Чернова Н.С., Новік Р.Б. Міжнародні підходи до відновлення об'єктів залізничної інфраструктури після збройних конфліктів. *Транспортні системи та технології перевезень*, (31), 2026. С. 96–103.

21. Червякова В. Організаційно-методологічні підходи до післявоєнного відновлення транспортно-логістичної інфраструктури України. *Журнал європейської економіки*. Том 22. № 4 (87). 2023. С. 597-622.

22. Квасов П.В., Продащук М.В. Удосконалення технології роботи залізничної транспортної інфраструктури із застосуванням інноваційних рішень у контексті управління ризиками та невизначеністю. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*, 2025, Вип. 214. С. 127-135.

23. Тарасов К.О. Удосконалення організації пасажирських перевезень в умовах пошкодження залізничної інфраструктури. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275 – Транспортні технології. Український державний університет залізничного транспорту, МОН України, Харків, 2025.

24. Мітуліс С.-А., Аргірудис С., Пантелі М., Фуджині К., Валканіотіс С., Гайнс В., Лінков І. Conflict-resilience framework for critical infrastructure peacebuilding. *Sustainable Cities and Society*. 2023. Vol. 91. 104405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104405>.

25. Полюх А. Transport Infrastructure Amid Protracted War: Challenges and Best Practices. Київ : Kyiv School of Economics, 2025. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/08/Transport-Infrastructure-Amid-Protracted-War_Poliukh-Artem.pdf (дата звернення: 28.03.2026).

26. Transparency International Ukraine. Restoring Railway Transport in Post-War Ukraine. Київ : Transparency International Ukraine, 2023. URL: <https://ti->

ukraine.org/en/research/restoring-railway-transport-in-post-war-ukraine/ (дата звернення: 28.03.2026).

27. Тригуба А., Гловацький С., Захко О., Тригуба І., Слободян С., Демчина В., Горецька І., Гуцол Т. System Model for Spatial Data Collection in Post-War Transport Infrastructure Planning. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, № 17. 7676.

28. Triantaphyllou E. Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study. *Dordrecht: Springer*, 2000. 289 p.

29. Rezapour M., Yin H. Importance Measures-Based Prioritization for Multi-State Systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. Vol. 215. P. 107852.

30. World Bank, Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA2), Washington DC: World Bank, 2023.

31. European Bank for Reconstruction and Development, Ukraine Recovery and Reconstruction Framework, London: EBRD, 2022.

32. АТ «Укрзалізниця». Нормативи часу на аварійно-відновлювальні роботи. Київ: УЗ, 2020., UNOSAT. Ukraine: Conflict-related Damage Assessment. Geneva: UNITAR, 2022–2024.

33. Institute for the Study of War (ISW). Ukraine Conflict Updates. URL: <https://www.understandingwar.org> (дата звернення: 30.03.2026 p.).

34. Stević Ž., Pamučar D., Subotić M., Antuchevičienė J., Zavadskas E. K. MCDM approaches for evaluating urban and public transportation systems: a short review of recent studies. *Transport*. 2022. Vol. 37. DOI: 10.3846/transport.2022.18376.

35. Çelikbilek Y., Moslem S., Duleba S. A combined grey multi criteria decision making model to evaluate public transportation systems. *Evolving Systems*. 2023. Vol. 14. P. 1–15. DOI: 10.1007/s12530-021-09414-0.

36. Alharairi M., Amin S. H., Zolfaghari S., Fang L. Fuzzy Analytic Hierarchy Process: A Comprehensive Literature Review. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*. 2025. Vol. 17(3). DOI: 10.13033/ijahp.v17i3.1311.

37. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw-Hill, 1980. 287 p.

38. Hwang C, L., Yoon K, Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications, Berlin: *Springer*, 1981, 259 p.
39. Rail.insider. Звіти про відновлення залізничної інфраструктури України 2022–2024. URL: <https://www.railinsider.com.ua>. (дата звернення: 20.04.2026 р.).
40. Центр транспортних стратегій (ЦТС). Аналітичні матеріали щодо відновлення УЗ 2023–2024. URL: <https://cfts.org.ua> (дата звернення: 20.04.2026 р.).
41. Kendall M. G. Rank Correlation Methods. 4th ed. London: Griffin, 1970. 202 p.
42. Tzeng G.-H., Huang J.-J. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. CRC Press, 2011. 352 p.
43. Zhang J., Li G., Zhang M. Multi-objective optimization for community building group recovery scheduling and resilience evaluation under earthquake. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2022. Vol. 38, No. 12. P. 1657–1676.
44. Ječmen K., Mocková D., Teichmann D. Solving Transport Infrastructure Investment Project Selection and Scheduling Using Genetic Algorithms. *Mathematics*. 2024. Vol. 12, No. 19. P. 3056.
45. Pisinger D. An exact algorithm for large multiple knapsack problems. *European Journal of Operational Research*. 1999. Vol. 114, No. 3. P. 528–541.
46. Кононюк А.Ю. Нейроні мережі і генетичні алгоритми. К. :«Корнійчук». 2008. 446 с.
47. Основи програмування. Python. Частина 1: підручник / А. В. Яковенко ; Електронні текстові дані. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 195 с.
48. Анісімов А.В., Дорошенко А. Ю., Погорілий С. Д., Дорогий Я. Ю. Програмування числових методів мовою Python : підруч. / за ред. А.В.Анісімова. К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2014. 640 с.
49. Morrison D. R. et al. Branch-and-bound algorithms: A survey of recent advances in searching, branching, and pruning. *Discrete Optimization*. 2016. Vol. 19. P. 79-102.

50. Sitarz S. Dynamic programming with ordered structures: Theory, examples and applications. *Fuzzy Sets and Systems*. 2010. Vol. 161, No. 20. P. 2623–2641.

51. Бідюк П. І., Меньяйленко О. С., Половцев О. В. Методи прогнозування. Луганськ: Луганський національний ун-т ім. Тараса Шевченка, 2008. Т. 1. 305 с.

52. Економіка та бізнес-інновації: підручник / за ред. д.е.н., проф. Л.Г. Мельника, д.е.н., проф. О.І.Карінцевої. Суми : Університетська книга, 2023. 702 с.

53. Методика інтегральної оцінки інвестиційної привабливості підприємств і організацій, затверджена Наказом Агентства з питань запобігання банкрутству №22 від 23.02.1998. Агентство з питань запобігання банкрутству. URL : <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/z0214-98> (дата звернення : 20.05.2026).

АКТ
перевірки кваліфікаційної роботи магістра
на наявність ознак академічного плагіату

Відповідно до даних сервісу Strikeplagiarism праця «УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ В УМОВАХ ВІЙНИ НА ОСНОВІ ПРІОРИТИЗАЦІЇ», автор Погорелов Віталій Вадимович, містить 0,39 % текстових збігів. Ознаки академічного плагіату відсутні.

Перевірку виконала доцент
кафедри залізничних станцій та вузлів



Ганна ШАПОВАЛ