

<https://doi.org/10.26565/2519-2310-2025-2-05>

УДК 004.415.2:519.876:656.2

РОЗРОБКА ТА ПРОГРАМНА ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ МОДЕЛІ МАРШРУТИЗАЦІЇ НА ЗАЛІЗНИЦІ

Артем Панченко¹, доктор філософії зі спеціальності комп'ютерні науки, доцент кафедри теоретичної і прикладної інформатики, e-mail: artem.panchenko@karazin.ua,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5865-6158>,

Ірина Зарецька¹, доктор філософії зі спеціальності математика, доцент кафедри теоретичної і прикладної інформатики, e-mail: zaretskaya@karazin.ua,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8747-2737>

Марина Владимірова¹, кандидат економічних наук за спеціальністю «Математичні методи в економіці», доцент кафедри теоретичної і прикладної інформатики,
e-mail: vladymyrova@karazin.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9868-2617>

Аліна Білецька¹, магістр, кафедра теоретичної і прикладної інформатики,
e-mail: aleesha.biletska@gmail.com,

¹*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
61022, проспект Свободи, 4, Харків, Україна*

Рукопис надійшов 1 жовтня 2025 р. Отримано після рецензування 2 листопада 2025 р.

Прийнято 2 грудня 2025 р. Опубліковано 30.12.2025 р.

Анотація: У сучасних умовах функціонування АТ «Укрзалізниця» ключову роль у забезпеченні економічної ефективності вантажних перевезень відіграє стратегія маршрутизації та вибір маршруту відправлення. Наразі маршрут здебільшого обирається за принципом найкоротшого шляху, що забезпечує мінімальні витрати палива на перевезення, а також зменшує амортизацію тягових потужностей та іншого рухомого складу підприємства. Відповідно, замовник перевезення сплачує мінімально можливу вартість доставки вантажу. Однак такі маршрути формуються на визначений період і не передбачають динамічної зміни, що спричиняє низку проблем, зокрема неврахування під час перевезення поточного технічного стану рухомого складу на окремих дільницях та рівня їх завантаженості. Особливо гостро ці проблеми проявилися внаслідок повномасштабного вторгнення Російської Федерації в Україну, яке призвело до руйнування частини залізничної інфраструктури, зокрема колій і мостів, а також до пошкодження або повного виведення з експлуатації частини тягового рухомого складу АТ «Укрзалізниця» та інших операторів залізничних перевезень. Водночас альтернативні підходи до маршрутизації наразі розглядаються обмежено через недостатню кількість досліджень, присвячених стратегічному управлінню процесами перевезень. У роботі описано процес розроблення та імплементації програмної моделі функціонування залізничної системи, основною метою якої є забезпечення можливості проведення експериментальних досліджень різних гіпотез щодо альтернативних підходів до маршрутизації. Це дозволяє розв'язати науково-прикладну задачу оптимізації вантажних залізничних перевезень шляхом формування гнучких стратегій управління. Дослідження базується на синтезі теорії графів (представлення мережі у вигляді зваженого мультиорієнтованого графа), дискретно-подієвого моделювання (DES) для аналізу динаміки процесів та змішаного цілочислового лінійного програмування

(MILP) для формування еталонних показників (бенчмаркінгу). Імплементовано гібридну політику готовності (Threshold Policy), що базується на параметрах мінімального наповнення поїзда та граничного часу очікування і забезпечує баланс між пропускну здатністю вузлів та термінами доставки. Розроблено спеціалізований програмний полігон мовою Python, який інтегрує життєвий цикл подій (Spawn, Form, Depart, Arrive) та дає змогу тестувати інтелектуальні стратегії управління в імітаційному середовищі. Практичне значення дослідження полягає у можливості використання розробленого інструментарію для кількісної оцінки ефективності різних стратегій маршрутизації та формування поїздів на сортувальних станціях. Створений програмний комплекс є фундаментальною основою для подальших досліджень авторів, спрямованих на мінімізацію середнього часу обороту рухомого складу та вузлових простоїв відправлень у реальних логістичних системах, що сприятиме підвищенню економічної ефективності вантажних перевезень.

Ключові слова: математичне моделювання, лінійне програмування, дискретно – подієве моделювання, імплементація математичних моделей, ефективність перевезень

Як цитувати: Панченко А., Зарецька І., Владимірова М., Білецька А., (2025) Розробка та програмна імплементація моделі маршрутизації на залізниці. *Комп'ютерні науки та кібербезпека*. 2025; № 2(28): С. 51–68. <https://doi.org/10.26565/2519-2310-2025-2-05>

In cites: Panchenko A., Zaretska I., Vladimirova M., Biletska A. (2025). Development and software implementation of a railway routing model. *Computer Science and Cybersecurity*. 2(28): 51–68. <https://doi.org/10.26565/2519-2310-2025-2-05> (in Ukrainian)

1. Вступ

Вантажні залізничні перевезення відіграють ключову роль у забезпеченні економічної стабільності України, зокрема в умовах глобальної реорганізації логістичних потоків та інтеграції з європейськими транспортними коридорами. З огляду на масштаби мережі та обсяг перевезень, ефективна маршрутизація вантажних поїздів є важливим елементом логістичного управління, що впливає на транспортні витрати, час доставки і загальну пропускну спроможність залізничної інфраструктури.

Процес визначення маршруту вантажного перевезення передбачає формування послідовності руху поїзда від станції відправлення до станції призначення з урахуванням технічних, експлуатаційних та організаційних обмежень. В умовах поточного стану транспортної системи України, зокрема наслідків бойових дій, які призвели до часткового руйнування інфраструктури, питання оптимальної маршрутизації набувають додаткової складності. На практиці Укрзалізниця застосовує стандартизовані процедурні правила, що не завжди сприяють досягненню оптимального логістичного рішення.

АТ «Укрзалізниця» розробила Правила перевезення вантажів, що визначають порядок організації перевезень, включно з формуванням маршрутів та оформленням документів. Ці правила встановлюють терміни подачі, порядок формування вагонів у маршрутні поїзди та загальні процедури планування перевезень, але не містять формальних критеріїв математичної оптимізації маршруту як такого. Зокрема, розділи Правил перевезення вантажів описують процедури планування перевезень, приймання та оформлення вантажів до перевезення, а також технологічні аспекти формування поїздів на станціях відправлення. У межах цієї нормативної бази також затверджено «Перелік умов щодо організації перевезень вантажів маршрутами», який деталізує технічні вимоги формування маршрутних поїздів та їх масу, довжину і

процедуру узгодження з регіональними філіями. Це важливий офіційний документ, який формує основу для операційної реалізації маршрутизації в Укрзалізниці [1].

У практиці АТ «Укрзалізниця» маршрут вантажного перевезення визначається не складними алгоритмами оптимізації, а через процедури та нормативні умови формування маршрутних поїздів, закріплені у «Переліку умов щодо організації перевезень вантажів маршрутами», затвердженому правлінням компанії. Згідно з цим документом:

1. Формування маршрутного поїзда здійснюється на під'їзних коліях або коліях станції відправлення за наявності відповідного колійного розвитку відправника.
2. Якщо відправник не має достатнього колійного розвитку для збору вагонів у поїзд, але обсяги вантажу дозволяють сформувати маршрутний поїзд у межах технологічного часу (зазвичай до 24 годин), то це узгоджується між регіональною філією та відправником.
3. В договорах про експлуатацію під'їзних колій і перевезення зазначаються параметри маршруту: норми маси та довжини поїзда, порядок подачі вагонів, час формування та повідомлення про завершення формування маршруту.

Це означає, що маршрутного поїзда як «шляху руху» у класичному математичному значенні (оптимальний граф у залізничній мережі) у правилах немає. Натомість Укрзалізниця керується процедурним набором умов, що дозволяють сформувати поїзд у межах технологічних обмежень, без експліцитної логістичної оптимізації шляху (тобто без явного вибору найкращого маршруту між вузлами мережі на основі критеріїв).

Однак, операційно-процедурний підхід, який використовується в Укрзалізниці (тобто накопичення вагонів, погодження формування поїздів із філіями, відправлення за графіком і наявними технічними умовами), не забезпечує:

1. Оптимального вибору шляху з логістичної точки зору: рішення про те, який шлях обрати між вузлами мережі, не ґрунтується на математичній оптимізації часу, капітальних витрат або пропускну здатності, а на правилах і технічних обмеженнях. Це відрізняється від інтегрованих моделей оптимізації, що описуються у транспортних науках та географії транспорту.
2. Гнучкого реагування на зміни інфраструктури: за значних змін у мережі (наприклад, частковому руйнуванні шляхів через війну) відсутня централізована модель, яка автоматично адаптує маршрути вантажних поїздів.
3. Інформаційної підтримки для стратегічного планування: система побудована більше на процедурній координації, ніж на автоматизованому інтелектуальному виборі маршрутів на основі даних у реальному часі (AI чи аналіз великих даних).

Таким чином, науково-практична проблема з розробки та дослідження альтернативних поточному підходів є актуальною. Слід зазначити що для цього необхідно розробити тестовий програмний полігон для перевірки та тестуванні різноманітних гіпотез алгоритмів маршрутизації з метою практичної оцінки їх ефективності.

В рамках поточного дослідження автори розробили та програмно імплементували таку імітаційну модель залізничних перевезень, що відповідає критеріям модульності (її можна розширювати та модифікувати без значних змін ядра моделі) та адекватності роботи моделі. Поточну роботу слід розуміти як фундаментальну основу та основний імітаційний інструмент для подальших наукових досліджень авторів, спрямованих на розробку алгоритмів, що підвищать економічну ефективність вантажних перевезень на залізниці.

2. Обґрунтування обраних методів моделювання

Для побудови математичної моделі маршрутизації вантажних перевезень у даній роботі використано апарат теорії графів як базовий інструмент формалізації транспортної мережі.

Такий підхід є загальноприйнятим у світовій практиці моделювання складних транспортно-логістичних систем і широко застосовується у дослідженнях, присвячених оптимізації залізничних перевезень, плануванню руху та управлінню потоками на мережах великої розмірності. Застосування теорії графів дозволяє перейти від описового представлення інфраструктури до строгої математичної моделі, придатної для аналітичного дослідження та алгоритмічної реалізації [3].

У рамках запропонованого підходу залізнична мережа подається у вигляді зваженого мультиорієнтованого графа $G = (V, A)$, де V - множина вершин, що відповідає станціям і вузлам мережі, а A - множина дуг, що відповідає перегонам між ними. Подібне представлення є стандартним у задачах транспортного моделювання та маршрутизації, оскільки воно забезпечує високий рівень абстракції та універсальність опису, дозволяючи враховувати багатоваріантність маршрутів, наявність паралельних перегонів і напрямленість руху [4]. Формалізація мережі у вигляді графа створює основу для застосування верифікованих алгоритмів комбінаторної оптимізації та методів дослідження операцій.

Елементи графової моделі мають природну інтерпретацію у термінах фізичної інфраструктури залізниці. Вершини графа моделюють станції, сортувальні вузли та інші технологічні пункти, в яких відбуваються операції формування та розформування поїздів, накопичення вагонів і виконання маневрових робіт. Дуги графа відповідають перегонам між станціями. Кожній дузі можуть бути поставлені у відповідність вагові параметри, зокрема довжина L_e , час проходження τ_e , експлуатаційна вартість або пропускна здатність. Це дозволяє формалізувати задачу маршрутизації як задачу пошуку оптимального шляху за заданим критерієм (мінімальний час, мінімальні витрати або багатокритеріальна оптимізація), що є класичною проблемою на графах [3].

Використання графових моделей також відкриває доступ до широкого спектра ефективних алгоритмів, добре досліджених у теорії алгоритмів і транспортних застосуваннях. Для задачі знаходження найкоротших шляхів широко застосовуються алгоритми Дейкстри та його узагальнення, які забезпечують поліноміальний час роботи навіть для мереж великої розмірності [5]. Для аналізу пропускної здатності та розподілу потоків використовуються моделі максимального потоку та мінімального розрізу, що дозволяють досліджувати вузькі місця мережі та оптимізувати використання інфраструктурних ресурсів. У контексті залізничних перевезень графові підходи успішно застосовуються для розв'язання задач планування руху поїздів, розкладів і маршрутизації вантажних потоків [6].

Додатковою перевагою графового підходу є його сумісність із сучасними методами імітаційного моделювання та математичного програмування. Графова структура мережі може бути безпосередньо інтегрована в моделі дискретно-подієвого моделювання або в задачі змішаного цілочислового лінійного програмування для дослідження динаміки транспортних процесів і оптимізації керуючих рішень. Така інтеграція забезпечує узгодженість між структурним описом мережі та алгоритмічними процедурами оптимізації, що є важливим для побудови масштабованих моделей реальних залізничних систем. Отже, використання апарату теорії графів у даній роботі обґрунтовується його математичною строгістю, природною відповідністю фізичній структурі залізничної мережі та наявністю розвиненого інструментарію алгоритмів оптимізації. Це створює надійну теоретичну основу для подальшої розробки моделей маршрутизації та дослідження ефективності управління вантажними перевезеннями.

У якості основного методу моделювання було обрано Дискретно-подієву імітацію (DES). Такий вибір обумовлено тим, що попри високу ефективність методів математичного програмування, зокрема змішаного цілочислового лінійного програмування (MILP) та нелінійної оптимізації, їх застосування в задачах моделювання залізничних транспортних систем має суттєві обмеження при відтворенні оперативної динаміки процесів. Такі методи, як

правило, орієнтовані на пошук стаціонарних або квазістатичних оптимальних рішень і недостатньо адекватно описують часову еволюцію системи в умовах невизначеності. Оскільки метою даної роботи є створення імітаційного полігону для дослідження адаптивних стратегій управління маршрутизацією в стохастичному середовищі, як основний інструмент обрано дискретно-подієве імітаційне моделювання (Discrete-Event Simulation, DES), яке широко застосовується для аналізу складних транспортних і логістичних систем [7].

DES базується на представленні системи як послідовності подій, що відбуваються у дискретні моменти часу та змінюють її стан. Такий підхід є особливо придатним для моделювання залізничних перевезень, де ключові процеси — прибуття та відправлення поїздів, формування составів, обробка вагонів на станціях — природно інтерпретуються як події. У транспортних дослідженнях показано, що DES дозволяє адекватно відтворювати складну взаємодію інфраструктурних ресурсів, рухомого складу та потоків заявок, забезпечуючи високу ступінь реалізму моделі.

Порівняно зі статичними аналітичними моделями, DES має низку принципів переваг. По-перше, цей підхід дозволяє природним чином враховувати стохастичні фактори, зокрема нерівномірність надходження вантажів, варіативність часу руху та технологічні затримки на станціях. У контексті залізничних систем це є критичним для оцінки надійності графіків і стійкості маршрутних стратегій до випадкових збурень. Дослідження у сфері транспортного моделювання підтверджують, що ігнорування стохастичності призводить до систематичного переоцінювання ефективності оптимізаційних рішень.

По-друге, DES забезпечує можливість явного моделювання динаміки накопичення черг $Q_{i \rightarrow j}(t)$ на сортувальних станціях і вузлах мережі. Черги є ключовим елементом функціонування залізничних систем, оскільки вони визначають затримки вагонів і впливають на пропускну здатність інфраструктури. У статичних моделях точне відображення черг вимагає складних апроксимацій або лінеаризації, тоді як у DES вони виникають як природний результат взаємодії подій. Це дозволяє досліджувати ефекти перевантаження, каскадні затримки та формування “вузьких місць” у мережі.

По-третє, дискретно-подієва імітація фіксує детальну хронологію взаємодії об’єктів і ресурсів, що створює можливість аналізу мікродинаміки процесів і кількісної оцінки так званої “ціни невизначеності” — різниці між теоретично оптимальними показниками та результатами функціонування системи в реальних умовах. Такий аналіз є особливо важливим для розробки адаптивних стратегій управління, орієнтованих на роботу в умовах неповної інформації та випадкових збурень. DES широко використовується як експериментальна платформа для тестування алгоритмів прийняття рішень і методів штучного інтелекту в транспортних системах.

Окремою перевагою обраного підходу є його сумісність з об’єктно-орієнтованою парадигмою моделювання, що є доцільною для детального опису технологічних процесів залізничних вузлів. У дослідженнях, присвячених імітаційному моделюванню роботи станцій, показано, що традиційні моделі часто характеризуються жорсткою прив’язкою програмної реалізації до конкретної технології, що ускладнює їх повторне використання та масштабування.

Альтернативний підхід полягає у представленні системи як сукупності взаємодіючих об’єктів — технологічних операцій, виконавців і матеріальних елементів інфраструктури. Важливим принципом є відділення формального опису технології від універсального моделюючого ядра. У такій архітектурі вагони, колії та інші об’єкти поєднуються з формалізованими моделями поведінки, які можуть бути представлені у вигляді скінченних автоматів. Це дозволяє створювати бібліотеки типових компонентів і повторно використовувати їх у різних конфігураціях моделі, істотно скорочуючи час розробки та підвищуючи гнучкість імітаційного середовища.

Таким чином, вибір дискретно-подієвого імітаційного моделювання як основного методу дослідження обумовлений його здатністю адекватно відтворювати стохастичну динаміку залізничних процесів, моделювати черги та ресурсні обмеження, а також слугувати експериментальною платформою для тестування інтелектуальних стратегій управління. Поєднання DES з об'єктно-орієнтованим підходом створює масштабовану та модульну основу для подальших досліджень у сфері оптимізації вантажних перевезень.

3. Математична модель залізничних перевезень

Топологія залізничної мережі в межах запропонованої моделі формалізується у вигляді зваженого мультиорієнтованого графа $G(V, A)$, що забезпечує строгий математичний опис структури інфраструктури та створює основу для подальшого алгоритмічного аналізу. Такий підхід дозволяє перейти від фізичного представлення мережі до абстрактної моделі, придатної для застосування методів теорії графів, оптимізації та імітаційного моделювання. Використання мультиорієнтованого графа є обґрунтованим з огляду на складну структуру реальних залізничних мереж, де між одними й тими самими вузлами можуть існувати декілька альтернативних маршрутів з різними технічними характеристиками. У цій структурі множина вершин $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ відповідає залізничним станціям, сортувальним вузлам та іншим інфраструктурним об'єктам, які виконують функції генерації, обробки або прийому транспортних потоків. Вершини графа інтерпретуються не лише як географічні точки, а як складні технологічні системи з власними ресурсними обмеженнями та операційними процесами. Множина дуг $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ описує перегони між станціями та визначає можливі напрямки руху поїздів. Орієнтований характер дуг дозволяє враховувати асиметрію параметрів руху в протилежних напрямках, що є характерним для реальних умов експлуатації.

Критично важливою особливістю моделі є реалізація графової структури у вигляді мультиграфа за допомогою класу MultiDiGraph бібліотеки NetworkX. Такий вибір інструментальних засобів забезпечує можливість явного представлення множинних паралельних зв'язків між парами вершин. У реальній залізничній інфраструктурі між станціями i та j часто існує декілька колій або альтернативних маршрутів, які можуть відрізнятися за технічним станом, пропускною здатністю або режимами експлуатації. У моделі ця множина описується як $A_{i \rightarrow j} = \{a_{i \rightarrow j}^1, \dots, a_{i \rightarrow j}^k\}$, що дозволяє враховувати конкурентні варіанти проходження та підвищує точність відтворення інфраструктурних особливостей.

Кожна дуга $a \in A$ характеризується вектором параметрів $p_a = \langle L_a, C_a, v_a, K_a \rangle$, який відображає ключові фізичні та експлуатаційні характеристики відповідної ділянки. Параметр L_a задає фізичну довжину перегону в кілометрах і використовується як базова метрика просторової відстані. Параметр C_a описує вагову норму або максимально допустиму довжину поїзда, що накладає обмеження на склад і масу рухомого складу. Середня дільнична швидкість v_a визначає часові характеристики руху та дозволяє оцінювати тривалість проходження перегону. Пропускна здатність K_a , виражена у парах поїздів за добу, в імітаційній моделі трансформується у дискретну кількість доступних слотів для одночасного використання ресурсу, що створює механізм урахування конкуренції за інфраструктуру. Таке параметричне описання дуг формує багатовимірний простір характеристик мережі, у якому можуть бути сформульовані різні критерії оптимальності. Воно також забезпечує можливість інтеграції графової моделі з імітаційними процедурами, де кожен перегін розглядається як ресурс з обмеженою пропускною здатністю та часовою динамікою використання.

Базова маршрутизація для кожного вантажного відправлення p , що генерується в системі, визначається статичний маршрут $P_p = (v_{start}, \dots, v_{end})$, який з'єднує початкову та кінцеву вершини. Задача маршрутизації формулюється як задача пошуку шляху мінімальної вартості у

графі G . У базовій конфігурації функцією вартості виступає довжина дуги L_a , що відповідає критерію мінімізації загальної відстані перевезення. Така постановка створює еталонний маршрут, який використовується як вихідна стратегія для подальшого аналізу.

Для знаходження оптимального шляху P^* застосовується алгоритм Дейкстри, який є ефективним методом пошуку найкоротших шляхів у графах з невід'ємними вагами. Алгоритм гарантує знаходження глобального мінімуму та має поліноміальну обчислювальну складність, що робить його придатним для використання у великих мережах. У контексті запропонованої моделі він забезпечує детерміновану та відтворювану процедуру побудови маршрутів, яка може бути використана як базовий рівень для порівняння з більш складними адаптивними або стохастичними методами маршрутизації.

Функціонування запропонованої моделі залізничної транспортної системи визначається сукупністю фізичних та технологічних обмежень, що відображають реальні інфраструктурні можливості мережі. Урахування цих обмежень є принципово важливим для забезпечення адекватності імітаційних результатів, оскільки вони формують простір допустимих станів системи та безпосередньо впливають на динаміку руху поїздів, формування черг і використання ресурсів. У моделі виділяються чотири основні класи обмежень: часові, місткісні, ресурсні та станційні.

Час проходження поїзда по дузі аmodelюється як детермінована базова величина $\tau_a = L_a/v_a$, що визначається відношенням довжини перегону до середньої дільничної швидкості руху. Така формалізація забезпечує узгодженість просторових і часових характеристик мережі та дозволяє безпосередньо інтегрувати їх у календар подій імітаційної моделі. Водночас реальні експлуатаційні умови характеризуються наявністю випадкових збурень, пов'язаних із технічними затримками, обмеженнями сигналізації або операційними факторами. З цією метою у модель вводиться стохастичний компонент δ_i , який модифікує базовий час проходження. Це дозволяє досліджувати чутливість системи до невизначеності та аналізувати вплив варіацій часу руху на загальну стабільність графіка.

Кожен перегін характеризується максимально допустимою місткістю, що інтерпретується як гранична довжина або маса поїзда. Під час формування складу виконується умова $\sum w_i \leq C_a$, де w_i — індивідуальні параметри вагонів. Це обмеження відображає технічні характеристики інфраструктури та тягового рухомого складу, а також гарантує експлуатаційну безпеку. У моделі воно реалізується як жорстке обмеження на допустимі конфігурації поїздів, що впливає на процес консолідації вантажів і може призводити до додаткових затримок у разі перевищення допустимих параметрів. Таким чином, місткісні обмеження формують зв'язок між мікрорівнем (структура поїзда) та макрорівнем (пропускна здатність мережі).

Пропускна здатність кожної ділянки мережі моделюється як обмежений ресурс із дискретною кількістю одночасно доступних слотів. Формально це реалізується у вигляді семафора ємністю K_a , який визначає максимальну кількість поїздів, що можуть одночасно перебувати на перегоні. Поїзд отримує дозвіл на вихід лише за умови наявності вільного ресурсу ($occupied < K_a$). Такий механізм дозволяє явно відобразити конкуренцію між потоками та відтворити ефекти насичення інфраструктури, що проявляються у вигляді заторів і черг. Моделювання пропускної здатності як обмеженого ресурсу є ключовим елементом аналізу вузьких місць і дослідження стратегій управління трафіком.

Станції в моделі розглядаються як складні обслуговуючі системи з обмеженими ресурсами накопичення та переробки. Параметр F_i задає кількість доступних колій для тимчасового розміщення вагонів і поїздів, тоді як R_i визначає максимальну інтенсивність виконання технологічних операцій, виражену в поїздах за годину. Ці обмеження формують локальні черги та впливають на синхронізацію процесів прибуття і відправлення. У поєднанні з обмеженнями перегонів вони створюють складну мережеву взаємодію, де станції виступають

вузловими центрами перерозподілу потоків. Сукупна дія зазначених обмежень формує багаторівневу систему взаємопов'язаних ресурсів, у якій поведінка окремих елементів впливає на глобальну динаміку мережі. Їх формалізація в межах єдиної моделі забезпечує можливість комплексного аналізу ефективності маршрутизації, оцінки стійкості до перевантажень та дослідження альтернативних стратегій управління перевезеннями.

Центральним елементом запропонованої системи управління є політика готовності до відправлення, яка визначає момент завершення процесу накопичення поїзда на станції та ініціює його відправлення на наступну ділянку маршруту. Цей механізм відіграє ключову роль у формуванні балансу між ефективністю використання рухомого складу та якістю транспортного обслуговування. Фактично політика готовності задає правило прийняття рішень у точці конфлікту між прагненням до максимального завантаження поїзда та необхідністю обмежувати час очікування вантажів.

У роботі реалізовано гібридну стратегію, що поєднує критерії завантаження та часу. Такий підхід дозволяє враховувати як ресурсну ефективність, так і сервісні вимоги, формуючи адаптивний механізм керування. Формально склад поїзда w , що перебуває у процесі накопичення на станції, вважається готовим до відправлення у момент часу \hat{t} , якщо предикат готовності $\Gamma_w(\hat{t})$ набуває значення

$$\Gamma_w(\hat{t}) = \left(y_w(\hat{t}) = C_e \right) - \text{Умова 1: Повне заповнення,}$$

$$\vee \left(y_w(\hat{t}) \geq \theta C_e \wedge \left(\hat{t} - t_w^{last} \geq T_{hold} \right) \right) - \text{Умова 2: Часовий тайм-аут}$$

де $y_w(\hat{t})$ — поточна заповненість складу, C_e — його максимальна місткість, $\theta \in (0,1]$ — коефіцієнт мінімального заповнення, T_{hold} — граничний час очікування після прибуття останнього вагона, а t_w^{last} — момент цього прибуття.

Перша умова відповідає ситуації повного заповнення складу і реалізує стратегію максимізації використання тягових і вагонних ресурсів. У цьому випадку поїзд негайно вважається готовим до відправлення, що мінімізує втрати пропускну здатності та забезпечує високу продуктивність мережі. Друга умова вводить часовий запобіжник, який активується за недостатньої інтенсивності надходження вагонів. Якщо рівень завантаження перевищує порогове значення θC_e , але протягом інтервалу T_{hold} не відбувається подальшого поповнення, система ініціює відправлення частково заповненого поїзда. Це дозволяє обмежити надмірні простой та зменшити середній час доставки.

Запропонована політика може бути інтерпретована як параметризований компроміс між двома конкуруючими цілями: мінімізацією експлуатаційних витрат і мінімізацією часових затримок. Параметр θ виступає регулятором ресурсної ефективності: його збільшення стимулює формування більш повних поїздів, але потенційно підвищує час очікування. Натомість параметр T_{hold} визначає допустимий рівень сервісної затримки та впливає на регулярність відправлень. Варіювання цих параметрів у межах імітаційної моделі дозволяє досліджувати різні режими роботи системи та будувати криві компромісу між продуктивністю і якістю обслуговування.

З точки зору теорії керування, описана політика є локальним правилом прийняття рішень, яке формує глобальну динаміку потоків у мережі. Її застосування призводить до виникнення складних нелінійних ефектів, зокрема синхронізації відправлень, формування хвиль навантаження та появи вузьких місць. Саме тому формалізація політики готовності у вигляді чітко визначеного предиката є необхідною умовою для подальшого аналізу стабільності системи та оптимізації параметрів управління.

4. Програмна імплементація моделі за допомогою Python

Програмна реалізація імітаційної моделі виконана мовою Python із систематичним використанням принципів об'єктно-орієнтованого програмування, що забезпечує модульність, розширюваність та керованість архітектури симулятора. Вибір Python зумовлений поєднанням високого рівня абстракції, наявністю розвинутої екосистеми наукових бібліотек та зручністю швидкого прототипування складних алгоритмічних систем. При цьому було свідомо обрано кастомну архітектуру симулятора замість використання готових спеціалізованих середовищ імітаційного моделювання (таких як AnyLogic або SimPy), що пов'язано з необхідністю глибокої кастомізації логіки взаємодії об'єктів і точного контролю над внутрішніми механізмами обробки подій.

Залізнична станція в моделі розглядається як сукупність взаємодіючих технологічних елементів, кожен з яких характеризується власним станом і правилами поведінки. Ефективне відтворення такої структури потребує представлення інфраструктурних об'єктів — станцій, перегонів, поїздів і вагонів — у вигляді окремих програмних сутностей із чітко визначеними інтерфейсами. Об'єктно-орієнтований підхід дозволяє інкапсулювати внутрішній стан об'єкта разом із методами його зміни в межах єдиного класу. Це забезпечує локалізацію логіки, зменшує зв'язність між компонентами системи та спрощує подальше масштабування моделі. Зокрема, додавання нових типів ресурсів або правил управління не потребує радикальної перебудови існуючої архітектури.

Архітектура симулятора побудована за принципом подієво-орієнтованої системи, у якій еволюція моделі описується послідовністю дискретних подій. Кожна подія інтерпретується як атомарна зміна стану системи, наприклад прибуття поїзда, завершення формування складу або звільнення ресурсу. Центральним елементом ядра симулятора є структура даних PriorityQueue, реалізована за допомогою модуля heapq, яка забезпечує ефективне хронологічне впорядкування подій. Використання пріоритетної черги дозволяє підтримувати календар подій у відсортованому стані та гарантує, що на кожному кроці моделювання обробляється найближча за часом подія.

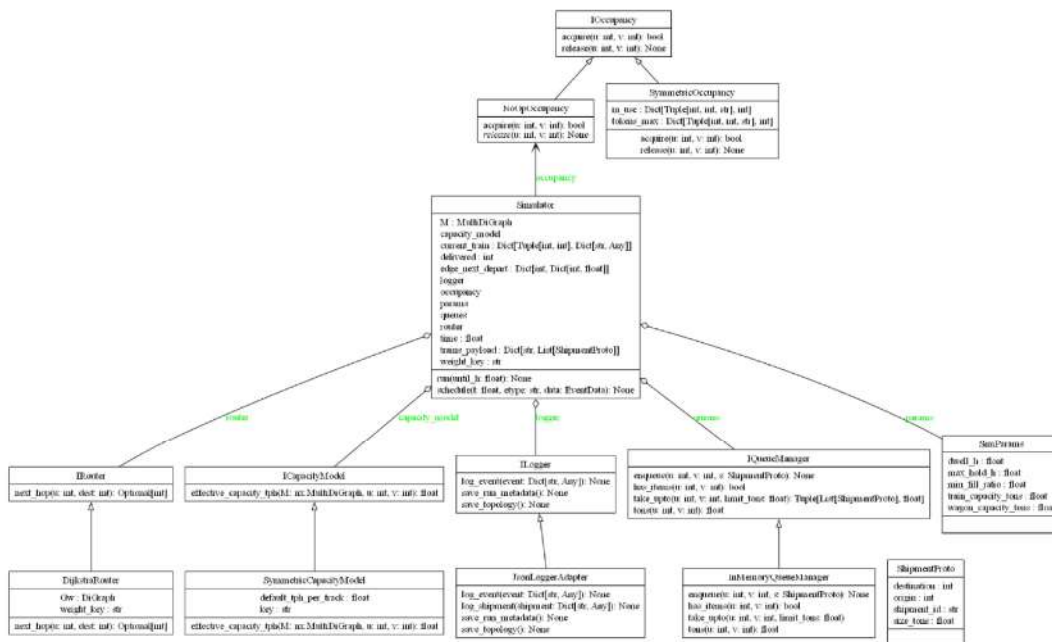


Рис. 1 – Діаграма класів імплементованої моделі залізниці
 Fig. 1 – Class diagram of the implemented railway model

Такий механізм організації обчислювального процесу забезпечує часову узгодженість симуляції та дозволяє моделювати складні причинно-наслідкові залежності між подіями. Крім того, пріоритетна черга має логарифмічну складність операцій вставки та вилучення, що є критично важливим для ефективної роботи моделі при великій кількості одночасно запланованих подій. У поєднанні з об'єктно-орієнтованою структурою це формує гнучку програмну платформу, придатну для реалізації експериментальних стратегій управління та інтеграції з алгоритмами оптимізації або машинного навчання.

Динаміка імітаційної моделі реалізується у вигляді подієво-орієнтованого процесу, в якому еволюція системи описується послідовною обробкою скінченної множини атомарних подій. Ці події формують замкнений операційний цикл, що відтворює повний життєвий цикл вантажу в мережі — від моменту його генерації до завершення перевезення. Така декомпозиція дозволяє формалізувати складні технологічні процеси у вигляді чітко визначених переходів стану, забезпечуючи прозорість логіки моделювання та можливість детального аналізу часової структури системи. У моделі виділяються чотири базові типи подій, які взаємодіють між собою та утворюють причинно-наслідковий ланцюг.

Spawn (генерація) - відповідає за ініціалізацію нового транспортного запиту та створення об'єкта вантажу в системі. На даному етапі фіксується час входу t_{in} , який використовується надалі для оцінки тривалості перевезення та показників якості обслуговування. Для згенерованого вантажу обчислюється оптимальний маршрут P^* у графі мережі, після чого визначається перша станція обробки. Вагон додається до відповідної черги накопичення $Q_{src \rightarrow dst}$, що представляє собою буфер для формування поїздів за напрямками. Таким чином, подія генерації інтегрує процес маршрутизації з локальною логікою станційного накопичення.

Try Form (спроба формування) - періодична керуюча подія, що виконує моніторинг стану черг накопичення на станціях. Її основною функцією є перевірка виконання предикату готовності Γ_w для потенційних складів. Алгоритм аналізує поточне завантаження, час очікування та доступність ресурсів інфраструктури. У разі виконання умов формується новий об'єкт типу Train, який агрегує вибрану групу вагонів. Після цього планується подія Depart. Якщо ресурси тимчасово недоступні, система зберігає стан очікування та повторно ініціює перевірку через визначений інтервал часу. Такий механізм реалізує адаптивну стратегію керування процесом консолідації вантажів.

Depart (відправлення) - моделює процес захоплення інфраструктурних ресурсів і початок руху поїзда. Симулятор намагається зменшити лічильник доступних слотів K_e на відповідному перегоні, що відповідає резервуванню пропускної здатності. Якщо $K_e = 0$, поїзд переводиться у стан очікування та розміщується в черзі доступу до ресурсу. У разі успішного захоплення перегону обчислюється прогнозований час прибуття $t_{arr} = t_{now} + \tau_e$, де τ_e — час проходження ділянки. Після цього в календар подій додається подія Arrive. Таким чином, відправлення поєднує управління ресурсами з часовим плануванням руху.

Arrive (прибуття) - завершує цикл використання перегону та ініціює наступну фазу обробки вантажів. Після прибуття поїзда ресурс звільняється ($K_e \leftarrow K_e + 1$), що робить його доступним для інших запитів. Далі виконується розформування складу: вагони, що досягли кінцевого пункту призначення, фіксують час виходу t_{out} і видаляються з системи, що дозволяє обчислити повний час доставки. Транзитні вагони сортуються за напрямками та додаються до відповідних черг накопичення, ініціюючи нові події Try Form. Цей етап забезпечує безперервність потоку та замикання циклу моделювання.

Сукупність описаних подій формує замкнену дискретно-подієву систему, в якій глобальна поведінка мережі виникає як результат локальних взаємодій. Така структура дозволяє

детально відтворювати часову динаміку транспортних процесів, аналізувати виникнення черг і досліджувати ефективність різних стратегій управління в умовах обмежених ресурсів.

З метою забезпечення керованої складності та підвищення модульності програмної архітектури модель побудована на принципі розділення відповідальностей між логікою інфраструктури та логікою агентів. Такий підхід дозволяє декомпонувати систему на відносно незалежні підсистеми, кожна з яких відповідає за окремий аспект функціонування транспортної мережі. Зокрема, в архітектурі реалізовано чітку сегрегацію «залізничного» сегмента, що описує рух поїздів як агрегованих транспортних одиниць, та «вантажного» сегмента, який моделює поведінку окремих вагонів як елементарних агентів.

Інфраструктурний рівень відповідає за управління ресурсами мережі — перегонами, станційними коліями та пропускною здатністю. Агентний рівень, у свою чергу, описує життєвий цикл вантажних одиниць і процеси їх агрегування в поїзди. Таке розділення дозволяє незалежно модифікувати правила руху поїздів і логіку обробки вантажів, що є важливим для проведення експериментів із різними стратегіями керування. Крім того, воно спрощує масштабування моделі, оскільки зміни в одному сегменті не потребують суттєвого перепроєктування іншого.

Взаємодія між цими сегментами реалізується через спеціальні точки синхронізації на станціях, які виконують роль інтерфейсів між мікро- та макрорівнем моделі. На нижньому рівні вагони розглядаються як автономні агенти, що перебувають у чергах накопичення та тимчасово блокуються до моменту формування поїзда. Створення об'єкта типу `\texttt{Train}`, який є агентом верхнього рівня, означає агрегацію групи вагонів у єдину транспортну сутність. У цей момент індивідуальна динаміка вагонів підпорядковується колективному стану поїзда.

Під час руху по перегону вагони делегують представлення свого стану об'єкту поїзда, який виступає проксі-агентом для всієї групи. Це дозволяє зменшити обчислювальну складність, оскільки операції управління ресурсами виконуються на рівні поїздів, а не окремих вагонів. По прибуттю на станцію призначення поїзд як агрегована сутність ліквідується, після чого вагони повертаються в активний стан індивідуальних агентів і знову беруть участь у процесах сортування та накопичення. Такий цикл агрегації та деагрегації забезпечує узгодження детального опису вантажних потоків із ефективним моделюванням руху поїздів.

Для розв'язання конфліктів за інфраструктурні ресурси в моделі реалізовано механізм зворотного зв'язку, що імітує диспетчерське регулювання руху. Якщо подія `Depart` не може негайно отримати доступ до необхідного ресурсу, вона не скасовується, а перепланується на майбутній момент часу. Інтервал повторної спроби визначається за експоненційним законом розподілу, що моделює стохастичний характер затримок і рішень диспетчера. Такий підхід запобігає втраті подій, підтримує стабільність симуляції та дозволяє досліджувати вплив перевантаження мережі на часові характеристики перевезень.

У сукупності описана архітектура формує багаторівневу агентно-інфраструктурну систему, в якій локальні правила взаємодії породжують глобальну динаміку транспортних потоків. Це створює гнучку платформу для аналізу стратегій управління, дослідження конфліктів ресурсів і оцінки ефективності різних організаційних рішень у складних логістичних мережах.

Однією з суттєвих методологічних проблем класичних дискретно-подієвих моделей транспортних систем є жорстка статичність опису інфраструктури. У традиційних реалізаціях кожен інфраструктурний елемент — зокрема окрема колія або ресурс станції — часто представляється як окремий програмний блок або іменована змінна. Такий підхід призводить до сильної зв'язаності коду з конкретною конфігурацією об'єкта моделювання, ускладнює повторне використання компонентів і практично унеможливує динамічне масштабування моделі. Будь-яка зміна топології станції або кількості ресурсів у такій архітектурі потребує

ручного втручання в програмний код, що підвищує ризик помилок і знижує відтворюваність експериментів.

У запропонованій роботі для подолання цієї проблеми застосовано підхід, заснований на використанні динамічних колекцій ресурсів, який дозволяє відокремити опис інфраструктурної конфігурації від алгоритмічної логіки симулятора. Основна ідея полягає в представленні однорідних інфраструктурних елементів не як фіксованого набору змінних, а як елементів параметризованих контейнерів, розмір і склад яких можуть змінюватися під час ініціалізації моделі. Це створює узагальнену абстракцію ресурсу, придатну для автоматизованої генерації різних конфігурацій без модифікації вихідного коду.

На рівні програмної реалізації станція описується як об'єкт, що містить колекцію однотипних ресурсів у вигляді списку або іншої динамічної структури даних, наприклад `self.tracks = [Track(), ...]`. Кожен елемент такої колекції є екземпляром класу `Track`, який інкапсулює стан конкретної колії та методи взаємодії з нею. На відміну від підходу з жорстко закодованими змінними типу `track_1`, `track_2`, використання списків дозволяє оперувати ресурсами через уніфіковані ітеративні процедури та узагальнені алгоритми розподілу.

Ключовою перевагою цього підходу є можливість конфігурації інфраструктури на основі зовнішніх описів, зокрема через вхідні JSON-файли. Параметри станції — кількість колій, їх типи та характеристики — зчитуються під час ініціалізації та автоматично трансформуються у відповідні об'єкти моделі. Таким чином, зміна структури станції або масштабування мережі зводиться до редагування конфігураційних даних без необхідності втручання в програмний код. Це підвищує гнучкість моделі, спрощує проведення серій експериментів із різними сценаріями та забезпечує відтворюваність результатів.

З архітектурної точки зору використання динамічних колекцій формує декларативний стиль опису інфраструктури, в якому структура системи визначається даними, а не жорстко зафіксованою логікою програми. Такий підхід сприяє кращій масштабованості, полегшує тестування альтернативних конфігурацій і створює передумови для автоматизованої генерації великих синтетичних мереж. У результаті модель набуває властивостей універсальної платформи, придатної для дослідження широкого спектра задач управління залізничними транспортними системами.

З метою підвищення реалістичності моделювання експлуатаційних процесів у системі передбачено стохастичний механізм розподілу інфраструктурних ресурсів. У реальних умовах диспетчеризація руху рідко зводиться до жорстко детермінованого правила типу «перший вільний ресурс». На практиці вибір колії або локомотива залежить від багатьох факторів — оперативної ситуації, локальних рішень персоналу та випадкових флуктуацій у завантаженні. Тому використання суто детермінованої схеми в імітаційній моделі може призводити до систематичних перекосів у навантаженні ресурсів і нереалістичного розподілу зносу інфраструктури.

У запропонованій моделі реалізовано стохастичну процедуру вибору ресурсу, яка імітує природну варіативність диспетчерських рішень і забезпечує більш рівномірне використання інфраструктури. Основна ідея полягає у випадковому виборі елемента з множини доступних ресурсів після попередньої фільтрації за умовами придатності. Такий підхід дозволяє зберегти технологічні обмеження (доступність, сумісність, стан ресурсу), одночасно уникаючи жорсткої пріоритетності окремих елементів.

5. Визначення еталонної маршрутизації

Оцінка ефективності розробленого симуляційного полігону здійснюється на основі системи ключових показників ефективності, що комплексно характеризують як якість

логістичного сервісу, так і ступінь використання інфраструктурних і рухомих ресурсів. Вибір відповідних метрик зумовлений необхідністю багатокритеріального аналізу, оскільки оптимальне функціонування транспортної системи передбачає одночасне врахування часових, пропускних і ресурсних характеристик. Запропонований набір показників дозволяє здійснювати кількісне порівняння різних стратегій управління та оцінювати їхній вплив на глобальну динаміку мережі.

Середній повний час перебування вагонів (S^-). Цей показник є базовою інтегральною метрикою якості транспортного обслуговування та відображає середню тривалість перебування вантажу в системі. Він вимірюється як різниця між моментом генерації вагона t_p^{in} та моментом його прибуття у кінцевий пункт призначення t_p^{out} , усереднена за всіма перевезеннями:

$$\bar{S} = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N (t_p^{out} - t_p^{in})$$

Показник S^- інтегрує в собі як час руху по мережі, так і всі проміжні затримки на станціях, тому він є чутливим індикатором загальної ефективності логістичного процесу. Зменшення цього значення свідчить про підвищення швидкості доставки та покращення якості сервісу.

Сумарний вузловий простій (W^-). Даний показник характеризує середній час очікування вагонів у чергах накопичення $Q_{i \rightarrow j}(t)$ на сортувальних станціях. Він відображає ефективність роботи вузлових елементів мережі та ступінь узгодженості процесів формування поїздів. Високі значення W^- свідчать про перевантаження станцій або неефективну організацію потоків. Мінімізація цього показника є важливою умовою підвищення пропускної здатності та зменшення затримок у системі.

Пропускна спроможність потоків ($\Phi_{s,t}$). Цей показник визначається як кількість вагонів, успішно доставлених між конкретною парою станцій «відправлення–призначення» (t) за фіксований часовий інтервал T . Він є прямою мірою продуктивності транспортної системи та дозволяє аналізувати ефективність обслуговування окремих напрямків. Порівняння значень $\Phi_{s,t}$ для різних сценаріїв дає можливість виявляти вузькі місця та оцінювати вплив управлінських рішень на структуру потоків.

Використання локомотивів (U_e). Показник U_e характеризує ступінь завантаження тягового рухомого складу на окремих ділянках мережі. Він визначається як відношення сумарного часу активного руху локомотивів до їхнього загального часу перебування в системі. Це дозволяє оцінити ефективність використання ресурсів і виявити як недовантажені, так і перевантажені ділянки. Аналіз U_e є важливим для оптимізації розподілу тяги та підвищення економічної ефективності експлуатації.

Сукупне використання зазначених показників формує багатовимірну систему оцінювання, що дозволяє всебічно аналізувати результати імітаційних експериментів. Такий підхід створює основу для обґрунтованого вибору стратегій управління та подальшої оптимізації функціонування транспортної мережі.

Для дослідження адаптивних стратегій управління та формування теоретичного еталону ефективності ключові керуючі змінні моделі інтерпретуються як параметри Політики готовності до відправлення (T_{hold}). Ці параметри визначають компроміс між швидкістю доставки та ефективністю використання ресурсів і, відповідно, виступають основними регуляторами поведінки системи. З метою стратегічного аналізу та отримання базового орієнтира оптимальності формується аналітична оптимізаційна модель у вигляді задачі змішаного цілочислового лінійного програмування.

Запропонована MILP-модель описує статичне, детерміноване та агреговане представлення транспортної системи, що контрастує з подієво-орієнтованою динамікою імітаційної DES-моделі. Її призначення полягає у визначенні стратегічно оптимального розподілу потоків і частоти формування поїздів за фіксований плановий горизонт. Така постановка дозволяє отримати нижню оцінку витрат та використовується як еталон для порівняння з результатами імітаційних експериментів.

Метою оптимізації є мінімізація сукупних системних витрат, що включають транспортну роботу та штрафи за простой вантажів на сортувальних станціях. Транспортна складова пропорційна часу руху по дузі та зважується коефіцієнтом α , тоді як вузлові затримки враховуються через штрафний коефіцієнт β :

$$\text{Мінімізувати } Z = \sum_{k \in K} \sum_{a \in A} \left(\alpha \cdot \frac{L_a}{v_a} \cdot x_a^k \right) + \sum_{k \in K} \sum_{i \in V_{\text{sort}}} \left(\beta \cdot w_i^k \right)$$

Тут змінна x_a^k описує обсяг потоку вагонів типу k по дузі a , а w_i^k моделює агрегований штраф за накопичення або простій відповідного вантажу на станції i . Така структура цільової функції забезпечує баланс між мінімізацією часу транспортування та зменшенням перевантаження вузлів мережі. Для коректного функціонування моделі необхідно імплементувати наступні системи обмежень.

Обмеження балансу потоків. Для кожної станції i і кожного типу вантажу k виконується умова збереження потоку, що гарантує узгодженість розподілу перевезень у мережі:

$$\sum_{a=(i,j) \in A} x_a^k - \sum_{a=(j,i) \in A} x_a^k = B_i^k$$

Параметр B_i^k визначає попит: додатне значення відповідає джерелу генерації потоку, а від'ємне - пункту призначення.

Обмеження місткості поїздів. Сумарний потік по кожній дузі не може перевищувати транспортну спроможність сформованих поїздів:

$$\sum_{k \in K} x_a^k \leq y_a \cdot C_{\max}, \quad \forall a \in A$$

Тут y_a — кількість поїздів, призначених для руху по дузі a , а C_{\max} — максимальна місткість одного складу.

Обмеження інтенсивності відправлень. Кількість поїздів, що формуються на сортувальній станції i протягом планового періоду T , обмежується її технологічною спроможністю:

$$y_{(i,j)} \leq R_i \cdot T, \quad \forall a = (i,j) \in A, i \in V_{\text{sort}}$$

Параметр R_i відображає максимальну інтенсивність обробки поїздів на станції.

Стратегічне обмеження мінімального розміру складу. Це обмеження є агрегованим аналогом динамічної політики формування поїздів і вимагає, щоб середній рівень завантаження не був нижчим за встановлений поріг:

$$y_{(i,j)} \cdot \theta C_{\max} \leq \sum_k x_{(i,j)}^k, \quad \forall a = (i,j) \in A$$

Параметр θ задає мінімальну допустиму частку заповнення складу та відображає стратегічну політику ефективного використання рухомого складу.

Умови цілочисловості. Змінні, що описують кількість поїздів, повинні бути невід'ємними цілими числами.

Запропонована MILP-постановка формує узагальнену стратегічну модель оптимального розподілу потоків і формування поїздів. Вона дозволяє дослідити вплив параметрів політики (T_{hold}) на системні витрати та слугує теоретичною базою для валідації результатів детальної дискретно-подієвої симуляції.

Як відомо, складність комбінаторної задачі узгодження пасажиропотоку та провізної здатності у великих мережах ускладнює пошук оптимального рішення традиційними методами. Для вирішення цієї проблеми пропонується застосування мультиагентних систем (MAS), де оптимізація досягається через динамічну взаємодію автономних сутностей. Цей підхід дозволяє трансформувати багатокритеріальну задачу оптимізації у процес переговорів (negotiation-based mechanism) між попитом та пропозицією. На відміну від централізованих моделей управління, у яких процес прийняття рішень зосереджений у єдиному керуючому алгоритмі, агентно-орієнтований підхід передбачає декомпозицію транспортної системи на множину автономних взаємодіючих сутностей. Кожна з таких сутностей інтерпретується як агент із власною локальною цільовою функцією, інформаційними обмеженнями та правилами поведінки. Подібна декомпозиція дозволяє відобразити децентралізований характер реальних транспортних процесів, у яких глобальна динаміка системи виникає як результат локальних рішень окремих учасників. У запропонованій моделі виділено шість типів гетерогенних агентів, що представляють різні функціональні рівні залізничної системи.

Агент-відправка (Shipping Agent) моделює сторону попиту на перевезення. Його основною функцією є вибір маршруту та часу відправлення на основі функції корисності, що враховує очікуваний час доставки, рівень завантаженості мережі та доступність ресурсів. Прийняття рішень здійснюється в умовах обмеженої раціональності: агент оперує неповною інформацією та використовує евристичні правила оцінювання альтернатив, що наближує модель до реальної поведінки логістичних суб'єктів.

Агент-поїзд (Train Agent) представляє сторону пропозиції транспортних послуг. Він відповідає за формування складу, планування руху та оптимізацію власного завантаження з урахуванням інфраструктурних обмежень. Цільова функція цього агента спрямована на максимізацію використання місткості поїзда та мінімізацію простоїв, що забезпечує ефективне використання рухомого складу.

Агент-маршрут (Route Agent) виконує аналітичну функцію генерації множини ефективних альтернативних маршрутів для кожної пари «джерело–призначення». Він формує обмежений набір невідомінованих шляхів за критеріями довжини, часу руху та навантаження, який використовується іншими агентами під час прийняття рішень. Таким чином забезпечується багатоваріантність маршрутизації та адаптивність системи до змін стану мережі.

Агент-колія (Track Agent) репрезентує інфраструктурний рівень і відповідає за контроль доступу до ресурсів перегонів. Він реалізує обмеження пропускної здатності, правила безпеки руху та механізми розподілу слотів між конкуруючими поїздами. Через взаємодію з цим агентом моделюються ефекти перевантаження та черг.

Агент-станція (Station Agent) функціонує як локальний координаційний вузол. На цьому рівні відбувається накопичення вагонів, формування поїздів і перерозподіл потоків між напрямками. Станційний агент приймає рішення щодо черговості обробки та ініціює взаємодію між агентами попиту й пропозиції.

Агент-мережа (Network Agent) виконує роль глобального спостерігача та координатора. Він контролює часову синхронізацію подій, керує ітераційними циклами симуляції та збирає статистичні показники. При цьому він не втручається безпосередньо в локальні рішення агентів, а забезпечує узгодженість функціонування всієї системи.

Запропонована багаторівнева агентна архітектура дозволяє розглядати транспортну систему як замкнений контур зворотних зв'язків, у якому зміни в пропозиції транспортних

ресурсів безпосередньо впливають на поведінку агентів попиту, а адаптація попиту, у свою чергу, модифікує навантаження на інфраструктуру. Такий підхід створює передумови для дослідження самоорганізаційних ефектів, виникнення вузьких місць та адаптивних режимів роботи мережі.

6. Висновки

У дослідженні розв'язано актуальну науково-прикладну задачу розробки математичної моделі та програмного забезпечення для оптимізації процесів маршрутизації та формування поїздів у вантажних залізничних перевезеннях. Отримані результати формують цілісну методологічну та інструментальну основу для створення імітаційного полігону, придатного для дослідження складних динамічних процесів у транспортних мережах та тестування адаптивних стратегій управління.

Обґрунтовано використання теорії графів як фундаментальної математичної бази для формалізації топології залізничної мережі та задач маршрутизації. Доведено доцільність застосування дискретно-подієвого імітаційного моделювання для відображення стохастичної природи транспортних процесів, що забезпечує переваги порівняно зі статичними аналітичними підходами. Розроблено формальний опис мережі у вигляді зваженого мультиорієнтованого графа з урахуванням інфраструктурних і технологічних обмежень, включно з параметризованою політикою готовності до відправлення поїздів. На цій основі реалізовано кастомний DES-симулятор мовою Python з подієвою архітектурою, що детально відтворює життєвий цикл вантажів і поїздів. Запропоновано систему ключових показників ефективності для комплексної оцінки якості функціонування моделі та сформульовано задачу змішаного цілочислового лінійного програмування як стратегічний еталон для порівняльного аналізу.

Основні наукові результати полягають у створенні комплексної математичної моделі залізничної мережі, яка інтегрує стратегічний MILP-підхід і динамічну DES-модель в єдину дослідницьку рамку. Такий гібридний підхід дозволяє кількісно оцінювати вплив невизначеності на ефективність перевезень і досліджувати розрив між теоретично оптимальними та практично досяжними рішеннями. Розроблена програмна реалізація демонструє високу гнучкість і масштабованість, забезпечуючи можливість моделювання складних сценаріїв та інтеграції з інструментами аналізу даних.

Експериментальні дослідження підтвердили суттєвий вплив стохастичних факторів на показники роботи транспортної системи та дозволили кількісно оцінити «ціну невизначеності». Показано, що використання адаптивних стратегій управління здатне значно зменшити затримки доставки та підвищити ефективність використання ресурсів. Практична цінність роботи полягає у створенні прототипу цифрового двійника транспортного полігону, який може застосовуватися для аналізу пропускну здатності, тестування нових організаційних рішень і проведення сценарного аналізу без втручання в реальний перевізний процес.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням моделі засобами прогнозування попиту на основі методів машинного навчання, а також з інтеграцією імітаційного комплексу з реальними інформаційними системами залізничних операторів для підтримки прийняття рішень у режимі реального часу.

Конфлікт інтересів

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

References

1. Cargo transportation rules :JSC "Ukrzaliznytsia". [in Ukrainian] https://www.uz.gov.ua/cargo-transportation/legal_documents/terms_of_freight/
2. Cargo transportation rules. Chapter 17 Rules for the carriage of goods by the sender's routes: JSC "Ukrzaliznytsia". [in Ukrainian] https://www.uz.gov.ua/cargo-transportation/legal_documents/terms_of_freight/264782/
3. Ahuja, R., Magnanti, T. and Orlin, J. (1993) *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Prentice-Hall, Upper Saddle River. https://books.google.com.ua/books/about/Network_Flows.html?id=WnZRAAAAMAAJ&redir_esc=y
4. Kurant, M., & Thiran, P. (2006). Extraction and analysis of traffic and topologies of transportation networks. *Physical Review E*, 74(3). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.74.036114>
5. Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). *Introduction to Algorithms* (3rd ed.). MIT Press. <https://www.cs.mcgill.ca/~akroitt/math/compsci/Cormen%20Introduction%20to%20Algorithms.pdf>
6. Gallo, G., Longo, G., Pallottino, S., & Nguyen, S. (1993). Directed hypergraphs and applications. *Discrete Applied Mathematics*, 42(2–3), 177–201. [https://doi.org/10.1016/0166-218X\(93\)90045-P](https://doi.org/10.1016/0166-218X(93)90045-P)
7. Luteberget, B., Claessen, K., Johansen, C. et al. SAT modulo discrete event simulation applied to railway design capacity analysis. *Form Methods Syst Des* 57, 211–245 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10703-021-00368-2>

DEVELOPMENT AND SOFTWARE IMPLEMENTATION OF A RAILWAY ROUTING MODEL

Artem Panchenko¹, PhD in Computer Sciences, Department of Theoretical and Applied Informatics
e-mail: artem.panchenko@karazin.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5865-6158>;

Iryna Zaretska¹, PhD in Mathematics, Department of Theoretical and Applied Informatics,
e-mail: zaretskaya@karazin.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8747-2737>;

Maryna Vladimirova¹, PhD in Economics specialized in Mathematical Methods in Economics,
Department of Theoretical and Applied Informatics
e-mail: vladymyrova@karazin.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9868-2617>

Alina Biletska¹, Master, Department of Theoretical and Applied Informatics, e-mail:
aleesha.biletska@gmail.com,

¹V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine

Manuscript was received October 1, 2025; Received after review November 2, 2025;

Accepted December 2, 2025; Published December 30, 2025

Abstract: Under current operating conditions of Ukrzaliznytsia, routing strategy and route selection play a key role in ensuring the economic efficiency of freight transportation. At present, routes are predominantly selected according to the shortest-path principle, which minimizes fuel consumption for transportation and reduces the wear of traction units and other rolling stock. Consequently, customers pay the lowest possible delivery cost. However, such routes are typically fixed for a predefined period and do not support dynamic adjustment, which leads to several issues, including the failure to account for the current technical condition of rolling stock on specific sections and their actual congestion levels during transportation. These problems have become particularly acute as a result of the full-scale invasion of Ukraine by the Russian Federation, which caused the destruction of parts of the railway infrastructure, including tracks and bridges, as well as damage to or complete loss of part of the traction rolling stock of Ukrzaliznytsia and other railway operators. At the

same time, alternative routing approaches remain insufficiently explored due to the limited number of studies devoted to strategic management of transportation processes.

This paper describes the development and implementation of a software model of railway system operations aimed at enabling experimental investigation of various hypotheses regarding alternative routing approaches. This provides a basis for solving a scientific and applied problem of optimizing freight rail transportation through the design of flexible management strategies. The study is based on a synthesis of graph theory (representation of the network as a weighted multidigraph), discrete-event simulation (DES) for analyzing process dynamics, and mixed-integer linear programming (MILP) for generating benchmark performance indicators. A hybrid threshold-based dispatching policy is implemented, relying on parameters of minimum train fill level and maximum waiting time, thereby balancing node capacity utilization and delivery times. A specialized simulation framework has been developed in Python that integrates the event lifecycle (Spawn, Form, Depart, Arrive) and enables testing of intelligent control strategies in a simulated environment. The practical significance of the research lies in the possibility of using the developed toolkit for quantitative evaluation of different routing and train formation strategies at classification yards. The created software complex serves as a fundamental platform for further research aimed at minimizing average rolling stock turnaround time and node-related dispatch delays in real logistics systems, thereby improving the economic efficiency of freight transportation.

Keywords: *mathematical modeling, linear programming, discrete-event simulation, implementation of mathematical models, transportation efficiency*

Conflicts of Interest: the authors declare no conflict of interest.