

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра «Управління експлуатаційною роботою»

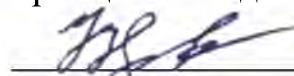
**УДОСКОНАЛЕННЯ ГРАФІКУ РУХУ ПОЇЗДІВ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ
ОПЕРАТИВНОГО КОРИГУВАННЯ ВІДХИЛЕНЬ**

Пояснювальна записка та розрахунки

до кваліфікаційної роботи

УГРПО.300.00.00.000 ПЗ

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


(підпис) **Владислав НИЖЕГОЛЬЦЕВ**

Керівник: доцент, канд. техн. наук

Олена МАЛАХОВА

Рецензент: доцент, канд. техн. наук

Максим КУЦЕНКО

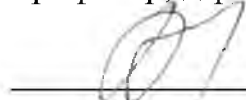
Освітній рівень: магістр

Спеціальність 275 Транспортні технології

275.02 Транспортні технології (на залізничному транспорті)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,
професор, д-р техн. наук

 Тетяна БУТЬКО

« 16 » березня 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Ніжегольцеву Владиславу Андрійовичу

1. Тема проекту (роботи) «Удосконалення графіку руху поїздів на основі моделі оперативного коригування відхилень»

Керівник Малахова Олена Анатоліївна, канд. техн. наук, доцент
затверджена розпорядженням по факультету управління процесами перевезень
від 23 лютого 2025 року №06/26

2 Строк подання здобувачем роботи 15 червня 2026 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Порядок розробки і складання графіку руху поїздів, статистичні дані щодо показників роботи господарства руху України та країн – членів ЄС, технологія роботи прикордонної передавальної станції у взаємодії з митними, технологія пропуску поїздів на одноколіній дільниці, джерела виникнення затримок при пропуску поїздів на дільницях

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1 Питання забезпечення ефективного поточного управління рухом поїздів 2 Аналіз показників експлуатаційної роботи на залізницях України та Європи 3 Коригування графіку руху - стохастичний підхід 4 Розрахунок економічного ефекту удосконалення управління змішаним вантажно-пасажирським потоком поїздів, в умовах оперативного коригування відхилень поїздів від ниток графіку руху Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1 Мета та задачі дослідження 2 Аналіз причин відхилень від нормативного графіка 3 Аналіз показників експлуатаційної роботи 3 Аналіз показників пунктуальності у країнах Європи 4 Графічна інтерпретація руху пари поїздів із зупинкою 5 Базова трипоїзна модель формування вихідних інтервалів 6 Параметри розподілів моментів прибуття

7 Розрахунок сукупного приросту економічного ефекту від впровадження системи
8 Висновки

6 Консультанти окремих розділів

Розділ	Прізвище, ініціали, посада та науковий ступінь консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Економічне обґрунтування запропонованого проектного рішення	Наталія ГРИЦЕНКО, доцент, канд. економ. наук		

7 Дата видачі завдання 16 березня 2026р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
Вступ	10.04.2026	виконано
1 Питання забезпечення ефективного поточного управління рухом поїздів	17.04.2026	виконано
2 Аналіз показників експлуатаційної роботи на залізницях України та Європи	27.04.2026	виконано
3 Коригування графіку руху - стохастичний підхід	20.05.2026	виконано
4 Розрахунок економічного ефекту удосконалення управління змішаним вантажно-пасажирським потоком поїздів, в умовах оперативного коригування відхилень поїздів від ниток графіку руху	30.05.2026	виконано
Висновки	02.06.2026	виконано
Оформлення роботи	15.06.2026	виконано

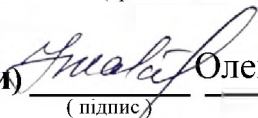
Здобувач


(підпис)

Владислав НИЖЕГОЛЬЦЕВ

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)


(підпис)

Олена МАЛАХОВА

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота включає в себе 17 слайдів презентації, 122 аркушів пояснювальної записки формату А4, що включає 47 рисунків, 2 таблиці, 75 літературних джерел.

Ключові слова: оперативне управління рухом поїздів, графік руху поїздів, диспетчерське регулювання, стохастичне моделювання, пунктуальність руху, вантажні перевезення, цифровізація залізничного транспорту, Укрзалізниця.

Метою дослідження є удосконалення графіків руху пасажирських поїздів у міжнародному сполученні з використанням логічних законів формування та моделювання пасажиропотоків.

Об'єктом дослідження є розроблення синхронізованих графіків руху пасажирських поїздів, що прямують у міжнародному сполученні.

У роботі досліджено питання оперативного планування та керівництва рухом поїздів в умовах сучасних викликів функціонування залізничного транспорту. Розглянуто модель процесу оперативного планування та диспетчерського управління рухом поїздів як результат системного аналізу інформаційних і керуючих процесів у системі диспетчеризації.

Запропоновано спосіб оперативного коригування графіка руху поїздів на основі виділення зон економічного пропуску та використання технології превентивного регулювання вантажопотоків. Розроблено стохастичну модель процесу руху поїздів, яка враховує випадковий характер експлуатаційних умов та реальні статистичні характеристики перевізного процесу. Запропонована методика дозволяє здійснювати імовірнісне прогнозування порушень графіка руху та підвищувати ефективність диспетчерського регулювання.

ABSTRACT

This thesis consists of 17 presentation slides and 122 A4-sized pages of explanatory notes, including 45 figures, 2 tables, and 5 references.

Keywords: operational management of train traffic, train schedule, dispatching, stochastic modeling, punctuality, freight transportation, digitalization of rail transport, Ukrzaliznytsia.

The aim of the study is to improve timetables for international passenger trains using logical principles for the formation and modeling of passenger flows.

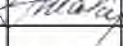
The subject of the study is the development of synchronized timetables for international passenger trains.

This paper examines issues of operational planning and train traffic control in the context of contemporary challenges facing the railway transport system. A model of the operational planning and dispatch control process for train traffic is presented as a result of a systematic analysis of information and control processes within the dispatch system.

A method is proposed for the operational adjustment of train schedules based on the identification of economic throughput zones and the use of preventive freight flow regulation technology. A stochastic model of the train movement process has been developed, which accounts for the random nature of operational conditions and the actual statistical characteristics of the transport process. . The proposed methodology makes it possible to perform probabilistic forecasting of schedule disruptions and improve the effectiveness of traffic control.

Зміст

Вступ	7
1 Питання забезпечення ефективного поточного управління рухом поїздів	12
1.1 Основні положення поточного планування та управління рухом	12
1.2 Завдання оперативного управління рухом поїздів	15
1.3 Гнучке управління рухом поїздів на дільницях	19
1.4 Аналіз процесу оперативного управління рухом поїздів	22
1.5 Конфлікти в русі поїздів та способи їх вирішення	26
1.6 Новий підхід до проблеми поточного управління рухом поїздів	29
1.7 Спосіб оперативної поточного управління руху	32
1.8 Оптимальний сценарій функціонування дільниці	36
1.9 Задача моделювання руху поїздів і коригування графіка	37
1.10 Нова меза-модель збудженого руху: дерево взаємовпливу	41
1.11 Вирішення задач поточного планування і управління рухом поїздів	46
2 Аналіз показників експлуатаційної роботи на залізницях України та Європи	49
2.1 Аналіз показників міжнародних вантажних перевезень в Україні	49
2.2 Аналіз показників пунктуальності у країнах Європи	50
3 Коригування графіку руху стохастичний підхід	61
3.1 Узагальнена стохастична модель руху поїздів	61
3.2 Базова модель формування інтервалів прибуття поїздів	65
3.3 Розподіл інтервалів прибуття при пакетному русі	72
3.4 Розподіл інтервалів прибуття з урахуванням реальної статистики	76

					УГРПО300.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Удосконалення графіку руху поїздів на основі моделі оперативного коригування відхилень	Літ.	Арк.	Акрупів
Розроб.		Ніжегольцев		15.06		i		
Перевір.		Малахова		15.06			6	122
Н. Контр.		Малахова		15.06		УкрДУЗТ		
Затв.		Бутько		15.06				

3.5 Уточнена модель формування інтервалів прибуття поїздів	81
3.6 Модель процесу оперативної корекції випадкових відхилень	84
3.7 Трансформація розподілу моментів прибуття при регулюванні	89
3.8 Статистичні характеристики руху поїздів по дільницях	94
4 Розрахунок економічного ефекту удосконалення управління змішаним вантажно-пасажирським потоком поїздів, в умовах оперативного коригування відхилень поїздів від ниток графіку руху	101
4.1 Порядок розрахунку показників економічної ефективності заходів щодо удосконалення управління змішаним вантажно-пасажирським потоком поїздів	102
4.2 Розрахунок економічної ефективності від впровадження автоматизованої системи управління рухом поїздів на змішаних дільницях	108
Висновки	112
Список використаних джерел	114

					УГРПО300.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Актуальність роботи. Удосконалення поточного планування та управління рухом поїздів є одним із основних способів вирішення актуальних завдань, що стоять перед галуззю. У Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року [1] до переліку пріоритетів науково-технічного розвитку включено «створення стійкої інфраструктури, сприяння всеохоплюючій і сталій індустріалізації та інноваціям», що передбачає впровадження оптимізуючих автоматизованих систем управління перевезеннями на основі процесної виробничо-економічної моделі експлуатаційної діяльності. Вирішення цього завдання вимагає наукового осмислення проблеми управління рухом поїздів, використання сучасних досягнень у сферах моделювання складних процесів, інформаційних технологій та штучного інтелекту.

Удосконалюючи методи управління рухом поїздів, виділяють два основні шляхи розвитку, один з яких спрямований на поліпшення привабливості залізниці для користувачів транспортними послугами, інший — на підвищення рівня технологій перевізного процесу. У даній роботі проблема поточного управління розглядається з другої позиції: як шлях поліпшення технології перевезень та ефективності роботи компанії-перевізника.

Щоб послабити вплив випадкових факторів, рух поїздів коригується в режимі реального часу. Методологія онлайн-моделювання, пошуку управлінських рішень розроблена далеко не достатньо, вимагає подальшого наукового опрацювання. Актуальність проблеми вдосконалення управління рухом підтверджується великою кількістю досліджень і розробок, що підтримуються АТ «Укрзалізниця» та провідними закордонними компаніями.

Принципи та методологія оперативного управління є одним із найважливіших розділів транспортної науки, що інтенсивно розвиваються в останні десятиліття. Проблемам управління та моделювання руху поїздів

присвячені роботи Т.В. Бутько, А.В. Прохорченко, А. Бергера, Р. Говерде, А. Д'Аріано, М. Ф. Кормана, Д. Торнквист, И. Хансена тощо.

Найбільшого розвитку набули методи та алгоритми, що дозволяють коригувати в реальному часі рух інтенсивного потоку пасажирських поїздів; ці методи не є ефективними при управлінні вантажним сегментом процесу. Методологія поточного планування та управління рухом поїздів на ділянках магістральної лінії зі змішаним вантажно-пасажирським рухом розвинена слабо. У даному дослідженні отримують своє доповнення та розвиток завдання пошуку та реалізація рішень щодо гнучкого управління змішаним потоком з використанням часових і економічних критеріїв.

При вирішенні завдань управління рухом у багатьох випадках використовуються детерміновані методи та моделі, що дозволяють прийняти оптимальні рішення. Менш розвинений стохастичний підхід, використання якого дає можливість оцінювати технічні та економічні ризики в процесі побудови та коригування графіка. Значні труднощі виникають при прийнятті диспетчерських рішень у складних і динамічних ситуаціях, що вимагає вдосконалення методології інтелектуальної підтримки роботи персоналу. Зазначені напрямки потребують подальшого розвитку.

Мета та завдання дослідження

Метою кваліфікаційної роботи є пошук ефективних рішень у процесі поточного управління змішаним вантажно-пасажирським потоком поїздів, спрямованих на зниження технічних та економічних ризиків на оперативне коригування відхилень поїздів від ниток графіку руху.

Для досягнення поставленої мети вирішуються *такі завдання*:

- аналіз технології поточного планування та управління рухом поїздів на змішаних ділянках;
- аналіз вітчизняного і закордонного досвіду виконання графіків руху поїздів і пунктуальності прибуття;
- обґрунтування нового способу організації руху поїздів з використанням механізму корекції розкладу в реальному часі;

- розробка, дослідження моделей формування та поширення затримок поїздів, пошук оптимальних коригувальних рішень з використанням механізму моделювання;

- економічне обґрунтування запропонованих рішень.

Об'єкт і предмет досліджень

Об'єктом досліджень є процес руху поїздів на змішаних дільницях залізниці в оперативних експлуатаційних умовах.

Предметом досліджень є закономірності виникнення порушень процесу руху та рішення щодо ефективного поточного управління рухом поїздів.

Елементи наукової новизни роботи

Загальний підхід, який ґрунтується на врахуванні технічних, організаційних, економічних аспектів функціонування залізниці, дозволив запропонувати нові ідеї, отримати такі наукові результати:

1. Запропоновано спосіб попереджувальних заходів диспетчерського регулювання руху поїздів на дільниці залізниці, який передбачає проведення оперативної корекції графікових часів ходу, інтервалів пакетного пропуску з метою ліквідації відхилень та зниження рівня експлуатаційних ризиків.

2. Розвинуто напрям стохастичного моделювання руху поїздів, процесу розмноження запізень, використання зазначеного підходу при обґрунтуванні параметрів графіка руху.

3. Набув розвитку механізми формування ймовірнісних характеристик моментів прибуття поїздів.

Практична значущість роботи

Основним нововведенням є посилення уваги до вантажного сегменту, управління яким має значну специфіку. Дослідження питань тонкого регулювання потоку поїздів шляхом корекції розкладу в реальному часі дозволило запропонувати нову методику проведення попереджувальних заходів диспетчерського регулювання, інші способи підвищення ефективності пропуску потоку.

Стохастичні моделі руху, дозволяють більш адекватно прогнозувати процеси виникнення та поширення відхилень від графіка. Запропоновані модель формування результату вантажних перевезень розширюють коло оптимізаційних задач.

Публікації.

За матеріалами кваліфікаційної роботи опубліковано тези доповіді на 38 міжнародній науково-практичній конференції "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті" [2] і на 6-ій міжнародній науково-технічній конференції «Інтелектуальні транспортні технології» [3].

1 Питання забезпечення ефективного поточного управління рухом поїздів

1.1 Основні положення поточного планування та управління рухом

Основу організації залізничного перевізного процесу утворюють графік руху та план формування. Ці документи розробляються на тривалий (річний) період часу. Відмінною рисою нормативного графіка є наявність резервів часу, введення яких дозволяє врахувати невизначеність умов протікання реальних процесів. Відхилення часу виконання окремих складових процесу (операційних інтервалів) виникають через технічні, технологічні відмови та зовнішні впливи, зокрема, зміни погоди.

Перевезення пасажирів і вантажів розглядають як процес, що протікає в умовах ресурсних обмежень. Основні труднощі викликані обмеженою пропускною, переробною спроможністю інфраструктури і кінцевим ресурсом локомотивної тяги. Періодично виникаючі труднощі, зокрема, дефіцит ресурсів (станційних колій, локомотивів), не повинні позначатися на зовнішніх результатах роботи — виконанні зобов'язань перед клієнтами. Для цього закладаються резерви та здійснюється оперативне управління, яке, по суті, є маневром ресурсами.

Поточне управління вантажним рухом реалізується на основі варіантного графіка. У варіантному графіку зберігаються нормативні значення часів ходу. Однак у тих випадках, коли прогнозується спад інтенсивності потоку поїздів, доцільно вносити коригування до деяких нормативів розкладу, щоб знизити експлуатаційні витрати. У періоди, коли інтенсивність використання ресурсів наближається до максимальної, неможливо говорити про високу якість пропуску поїздів. Наприклад, дотримання ходових часів на основі граничних можливостей тягових засобів унеможливорює застосування енергоефективних методів. Завдання оптимізації руху можна трактувати як пошук такого розподілу резервів часу і

технічних ресурсів між рухомими одиницями, при якому досягається найбільший ефект за заданим критерієм.

За наявності випадкових відхилень у багатьох випадках вихідний (нормативний) розподіл резервів виявляється неефективним, що спричиняє запізнення. Розклад руху вантажних поїздів виконується менш точно, ніж пасажирських. Відсоток відправлення за розкладом з вузлових станцій досить великий (понад 90 %), проте пунктуальність прибуття на проміжні роздільні пункти та вузлові станції низька. З метою стабілізації роботи системи використовують методи ситуаційного управління, що передбачає поєднання завчасної профілактики ймовірних проблем із швидким та ефективним реагуванням на вже виниклі труднощі. Існуюча технологія управління рухом поїздів недостатньо орієнтована на оперативне коригування процесів в умовах виникнення збурень. Шляхи забезпечення гнучкості оперативного управління рухом широко обговорюються дослідниками проблем транспорту (див., наприклад, [4]). Визнано, що ключовим моментом підвищення якості обслуговування користувачів та поліпшення економічних показників є коригування розкладу руху в режимі реального часу.

Завдання створення на українських залізницях механізму внесення оперативних коригувань у план формування і графік руху поїздів поставлено нещодавно [5]. Перешкодою на шляху використання технології гнучкого графіка є відсутність технічних і програмних засобів для моделювання, пошуку оптимальних рішень з управління рухом поїздів, які можна застосовувати в реальному часі.

У залізничній галузі України, охопленій процесом реформування, відбувся поділ сфер комерційних відносин (клієнт — оператор) та управління вагоно- і поїздопотоками. Комплекс функцій з організації та управління рухом на українських залізницях здійснює ЦУР (Центр управління рухом).

Щільність руху вантажних поїздів змінюється як від доби до доби, так і в межах кожної доби. Зазвичай щільність зростає наближаючись до звітної години (17:00 за київським часом) (рисунок 1.1). Причинами коливань є також ремонтні

«вікна» та нерівномірність надходження вантажів. Ця нерівномірність зростає за ринкових умов функціонування економіки [6]. На завантажених залізничних напрямках коефіцієнт варіації коливань досягає 0,12. Це означає, що в деякі доби (за статистикою — у п'яти відсотках випадків) спостерігається двократне зменшення кількості поїздів.

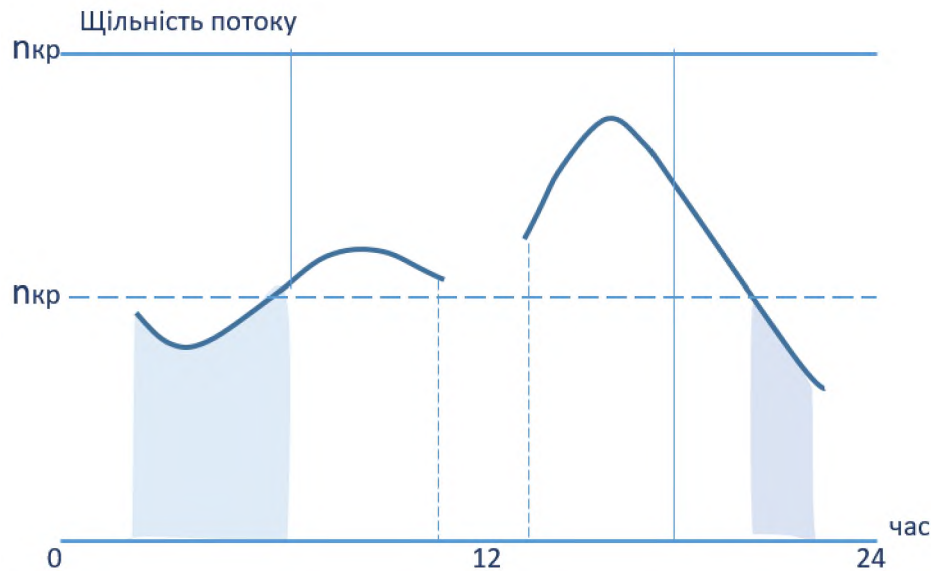


Рисунок 1.1 — Динаміка щільності руху поїздів протягом доби

Робота транспорту в конкурентному середовищі передбачає забезпечення гнучкого реагування на запити вантажовласників. Зокрема, функціонує механізм задоволення термінових заявок на перевезення. Так, у Західній Європі для вантажовідправників доступні терміни виконання заявок, що становлять кілька діб або навіть кілька годин [6]. Проблеми, що нерідко виникають на суміжних видах транспорту, на прикордонних переходах викликають потребу прискорення або уповільнення доставки деяких видів вантажу. Періодично трапляються ситуації гострого дефіциту вагонів певного типу. Очевидно, що в усіх зазначених випадках процес руху повинен оперативно підлаштовуватися.

При високому ступені використання пропускної спроможності зростає вплив кожного відхилення на рух інших поїздів. Дослідження свідчать, що на ділянці магістральної лінії протяжністю 200 - 210 км (за наявності резерву часу ходу в 54 хв.) у графік не вкладається 70 відсотків вантажних поїздів. Енергія, що втрачається при позапланових гальмуваннях, досягає 35 % від повного обсягу.

Прогноз розвитку ситуації на широкому полігоні управління дозволяє намічати коригувальні заходи. У роботі європейських вчених запропоновано методи попереджувального регулювання, які передбачають вибір оптимального режиму взаємодії станцій і дільниць.

Рух коригується у разі виникнення або зникнення перешкод для руху поїздів. Сигналами, що ініціюють застосування регулюючих заходів, є (а) відхилення від розкладу та (б) повідомлення про відмови або виникнення нових тактичних завдань. Сьогодні оперативне коригування процесу здійснює диспетчерський персонал, керуючись суб'єктивними оцінками ситуації, без належного прорахунку економічного результату. Обираючи варіант дій у складній ситуації, диспетчер орієнтується на нормативний графік лише під час регулювання руху пасажирських поїздів. Відсутність оптимальності прийнятих рішень призводить до значних втрат. Наприклад, підвищена витрата енергії при регулярному використанні «нагону» у вантажному русі супроводжується такою перевитратою витрат, яке може нівелювати виграш за рахунок прискорення руху. Виходом із ситуації є послаблення вимоги суворого дотримання графіка у вантажному сегменті в тих випадках, коли витрати на ліквідацію масових відхилень перевищують економічний виграш. Це здійснюється шляхом цілеспрямованої корекції часів руху в певні періоди часу. Параметри корекції повинні розраховуватися інтелектуальною системою підтримки прийняття рішень [7] з урахуванням економічного результату. Зазначений напрям досліджень розвинений слабо і потребує подальшого осмислення.

1.2 Завдання оперативного управління рухом поїздів

Завдання оперативного управління на залізничному транспорті досліджували вчені М.І. Данько, С.В. Панченко, А.В. Прохорченко, Г.О. Прохорченко, Т.В. Бутько, Д.М. Козаченко, А.М.Окороков та багато інших.

Основні проблеми в галузі управління також аналізували зарубіжні дослідники, зокрема, G. Sahin, D. Jovanovic, D. Kraay, P. Harker, S. Hallowell..

Автори фундаментальних праць у зазначеній галузі дотримуються таких вихідних позицій. Рух пасажирських поїздів, безумовно, підпорядкований нормативному графіку. У сегменті вантажних перевезень існують два способи організації перевезного процесу:

- з орієнтацією на обсяги вантажних перевезень (tonnage-based system);
- з опорою на графік руху (schedule-based system).

Досвід роботи залізниць низки провідних країн засвідчив ефективність роботи за розкладом. Багато перевізників, наприклад, північноамериканські залізниці, перейшли на систему розкладів у 90-х роках XX століття.

З досліджень останнього часу слід відзначити статті [8]. Перша з них використовує мультиагентний підхід при побудові оптимального графіка, друга розглядає класичний алгоритм розв'язання цієї задачі.

Автори сучасних фундаментальних праць з організації руху поїздів [9,10] пропонують таку класифікацію графіків. Стратегічний графік (strategic train schedule) є елементом довгострокового планування роботи мережі залізниць. На етапі середньострокового планування розробляється тактичний графік (tactical, master schedule). Тактичний графік фіксує розклади пасажирських поїздів і «графікових» вантажних поїздів (ядра руху), а також задає параметри руху рядових вантажних поїздів.

Основними характеристиками, що відображають якість процесу перевезення, є надійність виконання розкладу та економічний результат діяльності перевізника. Під надійністю розуміється, насамперед, точність відправлення та прибуття пасажирських поїздів до пунктів планових зупинок. Це завдання персонал виконує, не зважаючи на витрати. Надійність руху вантажних поїздів слід розуміти в іншому сенсі: забезпечення пропуску заданої кількості поїздів і відсутність запізнень на станції призначення.

Загальними характеристиками графіка руху в умовах випадкових збурень прийнято вважати його стійкість і стабільність. Під стійкістю графіка (timetable

robustness) розуміють здатність поглинати (гасити) малі поточні збурення [11]. Система управління, яка забезпечує стійкість, ефективно протистоїть відхиленням, що виникають. Зі збільшенням інтенсивності руху компенсаторний механізм починає давати збій, що призводить до збільшення затримок (knock-on effect). Характеристика стабільності графіка (timetable stability) [12] співвідноситься з інтервалом часу, який необхідний для відновлення нормативного руху після збою.

Зазначимо, що на закордонних залізницях (Європа, США) нормативний (орієнтовний) розклад регулює лише пункти відправлення та прибуття вантажних поїздів на вузлові станції — без фіксації моментів проходження проміжних станцій.

Потік вантажних поїздів на залізницях змішаного руху розподіляється за часовими зонами, вільними від впливу пасажирських поїздів. Періоди, в які пасажирські поїзди не впливають на рух вантажних, можуть трактуватися як зони вільного прокладання з гнучким вибором альтернативних маршрутів (варіаційний графік [13]).

Детальне опрацювання плану функціонування напрямків і діляниць — аж до окремого поїзда та окремої станції — проводиться до початку чергової доби. Регламентування процесу при цьому здійснюють за допомогою оперативного (варіантного) графіка руху (operational schedule).

При організації руху використовують уявлення про різні горизонти планування (rolling time–operational horizon). Горизонт макроуправління в просторовому вимірі охоплює залізничний напрямок (2–3 тис. км), у часовому — декаду та окремі доби. При вирішенні управлінських завдань цього рівня в якості критеріїв виступають обсяг тоннокілометрової роботи та розмір парку вагонів.

При моделюванні руху поїздів із деталізацією до окремого перегону (моделі мезарівня) горизонт планування становить 12 та 24 години. При переході до мікрорівня горизонт звужується до диспетчерського кола та інтервалу часу тривалістю не більше 3–4 годин.

Оптимізація пропуску по дільниці пасажирського поїзда або вантажного поїзда, що рухається за фіксованим маршрутом, здійснюється на основі критерію мінімального відхилення виконаного руху від нормативного розкладу. У періоди, коли потік поїздів великий, критерієм оптимальності руху вантажного потоку є коефіцієнт використання пропускної спроможності. У періоди спаду інтенсивності потоку управління доцільно здійснювати за критерієм експлуатаційних витрат, використовуючи гнучкий графік руху.

У ході перевезного процесу виникають відхилення, викликані впливом випадкових факторів. Повернення системи до нормативного стану здійснюється шляхом оперативного перепланування (real-time rescheduling), тобто коригування графіка руху в реальному часі. Такий оптимізований план називають актуальним (actual dispatching plan), його реалізація веде до поліпшення використання пропускної спроможності та зниження витрат. Коригування графіка є функцією диспетчерського управління будь-якого рівня — мережевого, регіонального (дорожнього) або лінійного.

Розв'язання задачі складання розкладу на різних горизонтах планування має свої особливості. Мережевий рівень передбачає визначення розкладу руху по укрупнених дільницях залізничного полігону. При цьому використовуються макромоделі руху поїздів. Складання розкладу для локальної просторово-часової області здійснюється на основі мезамоделі. Детальний графік локального рівня, який регулює рух поїздів усередині станцій та в зонах колійних перетинів, будується на основі мікромоделі дільниці.

Одним з основних ланок, що знижують ефективність роботи напрямку, є сортувальні станції. На їхню частку припадає основна частина (близько 80 відсотків) затримок вантажних поїздів. Ситуація поліпшується, коли графік виконання операцій з розформування та формування поїздів безперервно відстежується та коригується [14].

1.3 Гнучке управління рухом поїздів на дільницях

Основною функцією оперативного диспетчерського управління є компенсація відхилень у процесі руху поїздів. Властивість протистояти випадковим впливам — адаптивність — передбачає наявність таких способів коригування, які мають гнучкість, превентивність (здатність здійснювати профілактичні дії) та синхронність (мінімальне відставання керуючих впливів від моментів появи відхилень).

Перші ідеї та конкретні способи адаптації з'явилися наприкінці 30-х років минулого століття у задачах з оптимізації роботи підприємств. Виклад прикладної теорії пошуку та підтримання оптимального стану системи міститься у працях [15, 16]. Згідно з [17], адаптація (саморегулювання) означає поступову зміну усереднених властивостей системи в стохастичному середовищі. Відмінність від процесу регулювання полягає в тому, що адаптивна система здатна змінювати свою структуру, підлаштовуватися відповідно до змін середовища [18]. У фундаментальній праці з теорії адаптації [19] Дж. Траксел зазначив: «...перспективною рисою принципу адаптації є можливість введення механізму навчання... Коли навчання поєднується з пристосуванням, система управління набуває гнучкості та здатності вирішувати серйозні завдання».

Наявність усіх зазначених вище ознак дозволяє вважати процес регулювання руху поїздів з оперативним коригуванням графіка типовим адаптивним процесом. Адаптація проявляється в тому, що перед вирішенням оптимізаційної задачі в апаратно-програмному комплексі здійснюється вибір і налаштування моделі, що відповідає поточній ситуації.

Ідея адаптації руху вантажних поїздів до реальної ситуації виникла у 30-х роках минулого століття, коли почалося інтенсивне зростання обсягів перевезень. Було доведено, що жорстке регулювання руху поїздів значно знижує використання пропускнуєї спроможності та погіршує економіку залізниці, тому необхідно підлаштовувати графік руху відповідно до вимог реальної ситуації.

Недостатній розвиток технічних засобів тоді не дозволив реалізувати підлаштування графіка руху в реальному часі. Перспективи впровадження гнучкої технології виникли тоді, коли почалося масове оснащення залізниць прогресивними системами зв'язку, сигналізації та автоблокування.

Проблему реалізації ефективного диспетчерського керівництва в сучасній постановці досліджували представники різних шкіл, зокрема і у ряді країн Європи [20]. Однак способів тонкого налаштування руху відповідно до мінливих умов запропоновано небагато. Причиною цього є відсутність достатнього арсеналу засобів інформаційного забезпечення та теоретичного апарату, що дозволяє обрати оптимальне рішення.

Реформування українських залізниць у ХХІ століття актуалізувало завдання підвищення економічної ефективності перевезень. Управління перевезеннями стає одним із найважливіших чинників поліпшення економічних показників АТ «Укрзалізниця». Це зумовлює зростання кількості досліджень, у яких розглядається проблема гнучкого та ефективного управління. Зростає кількість досліджень, спрямованих на вдосконалення графіка руху. Ідея використання вантажного графіка з жорсткими нитками (нитками ядра) та додатковими (факультативними) нитками, по суті, є спробою впровадження елементів адаптивного управління в повсякденну практику.

У багатьох роботах, в яких досліджуються шляхи вдосконалення процесу руху поїздів, як вихідне приймається таке положення: передумовою для пом'якшення вимог до часових характеристик технічних процесів служать резерви, які закладені в графік. Це означає, що тривалість операцій на перегонах і станціях повинна — у необхідних випадках — встановлюватися індивідуально для конкретних рухомих одиниць. Ці обґрунтовані, економічно доцільні регулювання визначаються під час поточного планування.

Найактивніше в останньому десятилітті досліджується проблема оперативного коригування пасажирського розкладу в умовах виникнення випадкових відхилень. Пильна увага до вирішення зазначеної проблеми пов'язана

зі збільшенням обсягу перевезень у густонаселених районах світу: Європі, Японії, Південно-Східній Азії та ін.

На початку 2000-х років європейськими вченими запропоновано концепцію динамічного управління рухом пасажирських поїздів (Railway Dynamic Traffic Management - RDTM) [21]. У цій концепції визначається, що стійкість руху щодо відхилень забезпечується шляхом оперативного перерозподілу резервів часу, зміни послідовності та маршрутів пропуску поїздів.

Технологія RDTM ґрунтується на принципах заміни точних моментів прибуття/відправлення поїздів інтервалами («вікнами») із збереженням жорсткого публічного розкладу, а також коригування графіка в реальному часі. У рамках розвитку зазначеної концепції розроблено методологію моделювання [22, 23]. Більшість робіт з питань поточного перепланування використовує детерміновані моделі руху на дільниці. У процесі пошуку оптимальних регулювань вирішуються два види задач: виявлення, вирішення конфліктів (CDR) та узгодження швидкості руху поїздів (TSC) [24, 25].

Як критерії при вирішенні оптимізаційних задач щодо коригування пасажирського руху використовуються показники пунктуальності. Як правило, розглядається сумарна величина запізнь по всіх поїздах у заданий період часу (найчастіше, за годину). Роботи, в яких намагаються застосовувати економічні показники якості пропуску пасажирського потоку, так чи інакше, інтерпретують запізнення поїздів. Пошук регулювань, які зменшують запізнення, здійснюється з використанням дискретних моделей і методів лінійного програмування [24, 26].

У деяких роботах [27, 28] лише висловлюється ідея оцінювання результатів заходів щодо поліпшення пропуску вантажних поїздів на основі аналізу витрат. Аналогічна задача формулюється і для сфери автомобільних вантажних перевезень [29].

Останні роки ознаменувалися значним зростанням інтересу дослідників і розробників до проблеми створення інтелектуальних транспортних систем (ІТС). Концепція ІТС передбачає використання механізму адаптації як одного з

головних принципів побудови системи управління. Найбільш інтенсивно розвивається цей напрям у галузі автомобільного транспорту [30, 31].

Ідея створення інтелектуальної системи управління залізничними перевезеннями вперше була висловлена вченими США в останньому десятилітті ХХ століття [32]. Концепція залізничної ІТС остаточно сформульована у працях вчених КНР [33] і підтримана роботами українських вчених [34, 35, 36, 37, 38]. На сучасному етапі високий рівень розвитку інформаційних технологій, алгоритмічного та програмного забезпечення дозволяє реалізувати ідею адаптації всього транспортного процесу до мінливого середовища.

1.4 Аналіз процесу оперативного управління рухом поїздів

1.4.1 Класифікація задач оперативного управління рухом

Головною ознаку, що визначає особливості управління, є розгортання процесу в часі. Відповідно, управлінські задачі характеризують як динамічні. Задачі, де неможлива сувора формалізація з використанням аналізу на рівні тонкої структури, до класу оптимізаційних не відносять. Ці задачі називають «управлінням за відхиленнями». При цьому автори обходять мовчанням іншу найважливішу властивість транспортного процесу — його стохастичність. В управлінських задачах, коли майбутні реальні умови можна спрогнозувати лише з певною ймовірністю, жодна деталізація не дає надійного рішення оптимізаційної задачі.

Управління виробничим процесом можна розділити за типом механізму прийняття рішень на консервативне та превентивне. Консервативне (коригувальне) управління передбачає дії особи, яка несе відповідальність за хід процесу та приймає рішення (ЛПР), у відповідь на вже виникле відхилення від заданого стану. Такий вид називають управлінням за подіями (event-driven control). Превентивне управління — це вжиття профілактичних заходів,

призначених для виключення (або пом'якшення наслідків) ймовірних відхилень у майбутньому розвитку процесу. Якщо ж збій, всупереч прогнозу, не реалізується, резерв використовується для отримання виграшу у витратах ресурсів.

Концепція безперервного управління за часом (time-driven control) передбачає, що дані моніторингу дають органу управління можливість завчасного виявлення вже виниклих і майбутніх конфліктів, розробки заходів щодо їх запобігання. Таке алгоритмічне рішення прийнято називати коригуванням (переплануванням) у реальному часі (real-time rescheduling).

1.4.2 Узагальнена модель процесу диспетчерського управління

Досліджуючи особливості диспетчерського керівництва, орієнтованого на використання адаптаційних механізмів, пропонуємо модель процесу оперативного управління на залізниці. Застосувавши методологію системного аналізу [39], робимо висновок, що сфера управління перевезеннями побудована за ієрархічним принципом. Узагальнена модель процесу поточного управління при цьому представлена у вигляді набору кілець регулювання різного рівня (рисунок 1.2). Кожне з кілець містить елемент контролю та елемент формування керуючого впливу.

Завдання — вихідні установки — надходять з вищого рівня управління. При переході з вищого рівня на нижчий змінюються характер цільових установок і сукупність показників плану. Оперативне управління макрорівня спрямовано, переважно, на виконання обсягів перевезень, тобто на забезпечення доходів корпорації. Водночас, цілепокладання на нижчих рівнях більше орієнтоване на максимально ефективне використання основних засобів і ресурсів, тобто на зниження витрат. Багатоетапність процесу відображається у поділі на довгострокове (на період року і більше), середньострокове (квартальне, місячне) та оперативне планування [40].

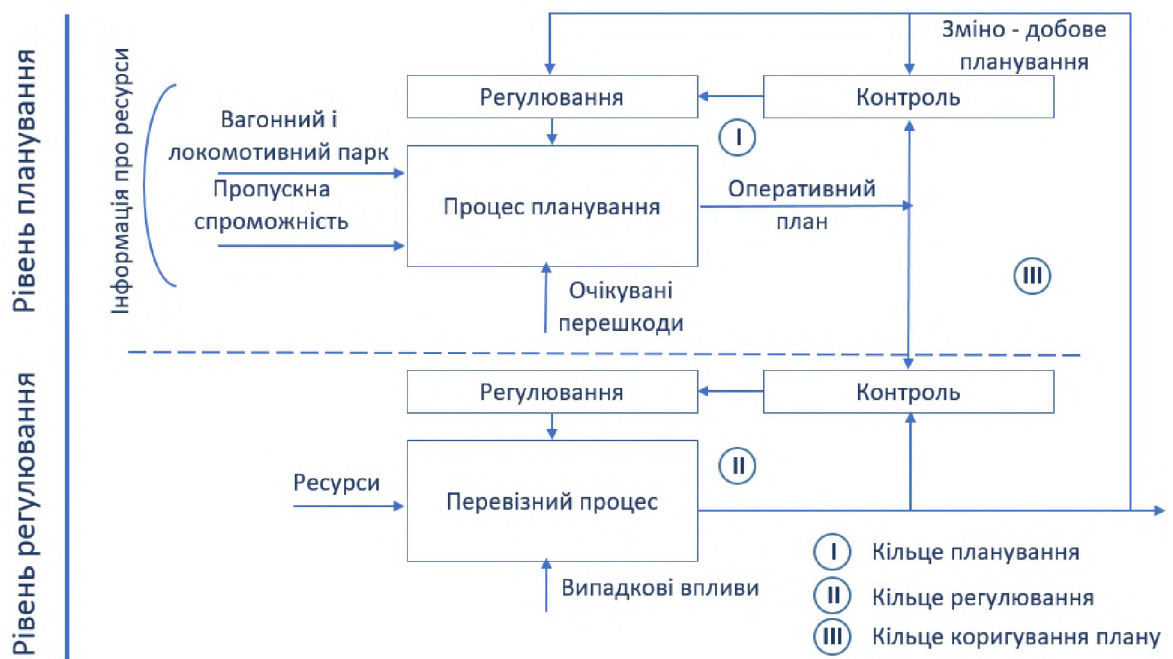


Рисунок 1.2 — Модель процесу оперативного управління

У ряді досліджень мету диспетчерського управління розуміють як безумовне дотримання графіка руху — без урахування пріоритетності пропуску поїздів. За такого підходу можна стверджувати, що в ролі диспетчера здатний успішно працювати автомат. Відхилення від графіка усуваються в результаті спрацьовування контуру регулювання. Диспетчер разом із технічними засобами, що його обслуговують, — телекомунікаціями, системою ДЦ та ін. — у такому контексті представлений у вигляді ланцюга регулювання, що описується детермінованою функцією $A[\varepsilon(t)]$, де $\varepsilon(t)$ — розбіжність між фактичним і нормативним графіками. Результатом дій диспетчера є така зміна швидкісних характеристик поїздів, яка призводить до зменшення відхилень.

Коригування траєкторії руху кожного засобу в адаптивній системі здійснюється шляхом поєднання двох видів впливу — від бортової системи керування та від диспетчера. Щоб забезпечити високу ефективність процесу, необхідно узгодити між собою зазначені впливи. Узгодження здійснюють шляхом реалізації дворівневого позиційного керування. Перший рівень передбачає повністю задану програмну траєкторію об'єкта. Якщо програмний рух об'єкта порушується, ідентифікацію функції руху вирішує другий рівень.

Завдання напівавтоматичного управління поширені в диспетчерській практиці, як показано на рисунку 1.3, другий рівень представлений оператором, який, використовуючи власні дані про рух об'єкта, керує ним.

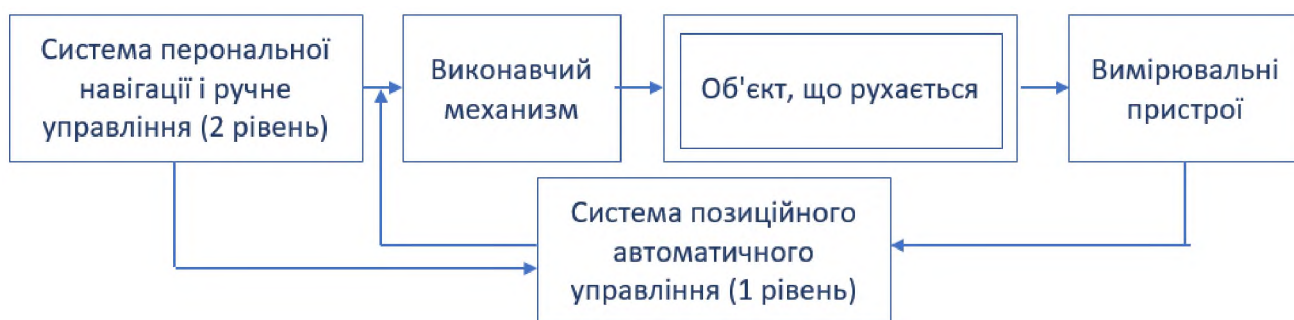


Рисунок 1.3 — Структура системи дворівневого керування

Перший рівень управління вступає в дію в екстремальній ситуації. Створивши перший рівень, що працює в автоматичному режимі («автодиспетчер»), вдається допомогти оператору, оскільки тепер для формування стратегії другого рівня необхідне знання лише виродженої системи.

Досвід створення та експлуатації АСУ промисловими об'єктами показав, що в умовах виникнення нестандартних (екстремальних) ситуацій, коли високий рівень невизначеності та є дефіцит часу, просте нарощування обсягу інформації малоефективне. В основі нового підходу до управління лежить когнітивна концепція дій оператора, яка визнає визначальну роль знань у завданні розробки оптимального рішення.

На рисунку 1.4 наведено схему реалізації інформаційних процесів в інтелектуальній АСУ. В автоматизовану систему, що підтримує роботу оператора, надходить актуальна інформація з об'єкта. Система імітує процес, що включає узагальнення ситуації, вибір тактики вирішення конфлікту, пошук рішень, близьких до оптимальних. Набір рішень пропонується оператору, який має право відхилити або прийняти будь-яке з них.

На перших етапах створення інтелектуальних керуючих систем у 80-х роках ХХ століття здавалося, що в багатьох сферах автомати замінять людину-оператора. Таких змін не відбулося; створені й успішно функціонують когнітивні системи, де людина й техніка співпрацюють у здійсненні ефективного управління.

Причини відсутності повної заміни: ненадійність рішень, що приймаються автоматом у складних умовах, та неповна довіра людини до роботи техніки в потенційно небезпечних ситуаціях.

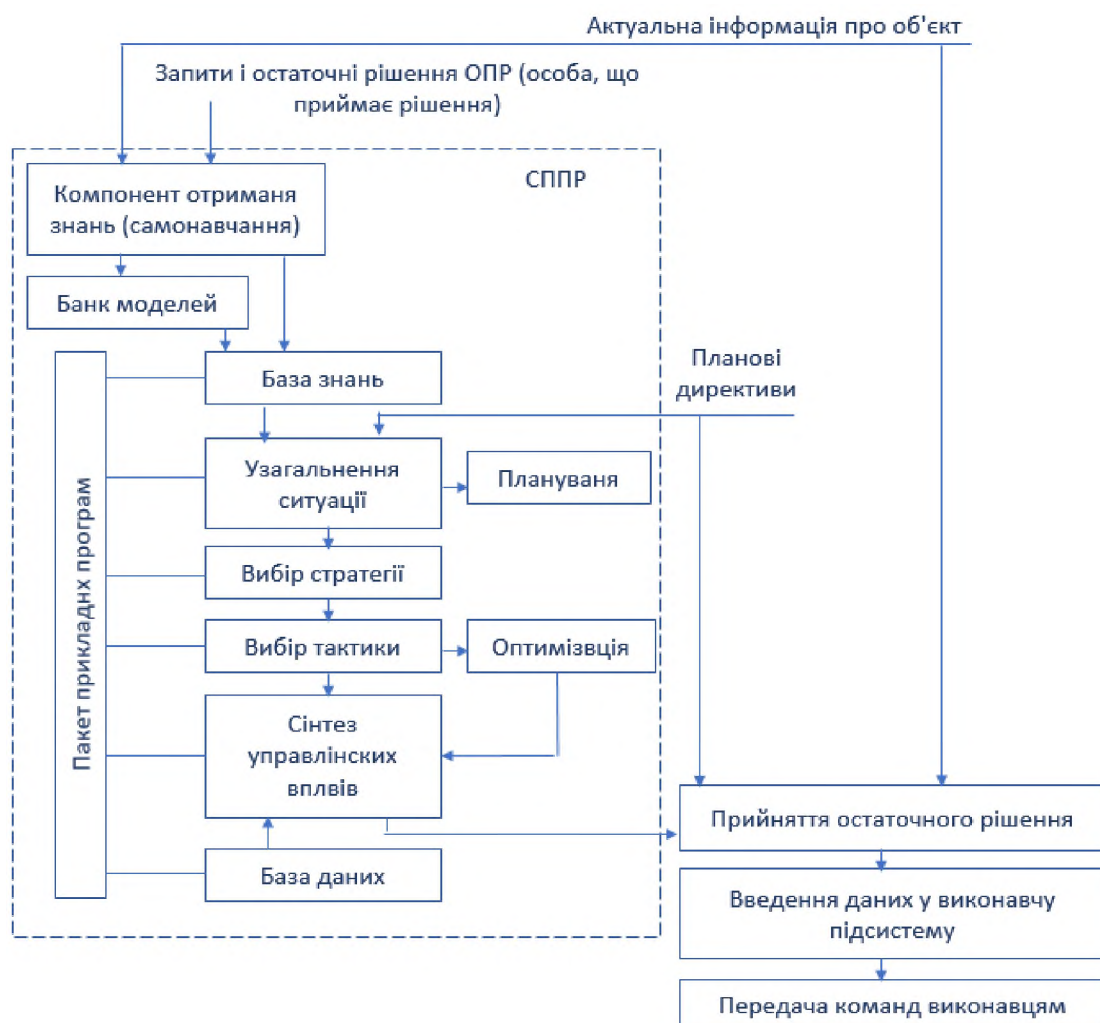


Рисунок 1.4 — Інформаційні процеси в інтелектуальній АСУ

Наприклад, в результаті вивчення роботи поїзних диспетчерів зроблено висновок: слід проявляти обережність у використанні таких людино-машинних систем, в яких істотно знижена поінформованість оператора про стан об'єкта.

1.5 Конфлікти в русі поїздів та способи їх вирішення

Метою коригування графіка руху в реальному часі є ліквідація виниклих відхилень та максимально можливе виключення майбутніх конфліктів між поїздами. Конфлікт виникає при прагненні двох (або більше) поїздів

використовувати елемент колійної інфраструктури (блок-ділянку) протягом одного й того ж відрізка часу. Ознакою конфлікту є зменшення інтервалу між поїздами до критичного значення.

Причинами виникнення конфлікту є:

- порушення процесу пропуску на попередніх дільницях;
- відмінності у швидкісних характеристиках та тяговому потенціалі поїздів;
- втрати швидкості, зупинки, спричинені технічними та технологічними несправностями.

Відхилення від графіка відбуваються також через необдумані дії людей — машиністів поїздів та працівників станцій. Наприклад, значна частина відхилень зумовлена невідповідністю параметрів і характеристик поїздів (тяги, ваги тощо) стандартним. Машиністи по-різному враховують ці особливості, а також реагують на спорадичні зміни умов пропуску, допускаючи порушення розкладу.

Затримки поїздів поділяють на первинні та вторинні. Первинна затримка виникає, якщо відбувається відмова обладнання поїзда або якщо система безпеки видає заборонний (обмежувальний) сигнал, що свідчить про відмову інфраструктури. Якщо ж ускладнення викликане тим, що елемент зайнятий іншим поїздом, затримку вважають вторинною. Події, що призводять до затримок (або прискорень) у русі поїзда, можуть бути детермінованими або випадковими (раптовими).

Заходи щодо підвищення відмовостійкості розкладу руху певною мірою знижують взаємовплив поїздів при виникненні затримок. Наприклад, є пропозиції щомісяця підлаштовувати вантажний сегмент розкладу під обсяги руху. Очевидно, що використання такого варіанту є малоефективним через неврахування «швидких» коливань обсягів руху. Аналіз реальних даних показує, що й добове планування не сильно покращує інформацію.

Статистичні дані свідчать про низький рівень дотримання розкладу руху поїздів на залізничній мережі. Однією з головних причин є збільшення інтенсивності руху поїздів. У ринкових умовах нерівномірність потоку вантажних поїздів зростає. На завантажених напрямках з інтенсивністю понад 3000 вагонів

на добу коефіцієнт варіації добових коливань досягає значення 0,12, при цьому пунктуальність знижується, при цьому відсоток виконання графіка проходження зменшується на 2,8 %.

Ступінь використання пропускну́ї спроможності магістральної лінії значно знижується (на 15–20 відсотків) внаслідок технічних відмов і ремонтних «вікон» [41].

У процесі вирішення конфлікту оптимізується траєкторія руху кожного з поїздів, планується їх раціональне підведення до станцій. Незначні відхилення усуваються шляхом регулювання швидкісних характеристик поїздів (delay management), серйозні збої — шляхом зміни порядку їхнього руху (disruption management) [42]. Процедуру коригування розкладу в режимі реального часу характеризують як оперативне перепланування руху поїздів. Операцію перепланування проводять із заданою періодичністю (1 або 10 хв.) або в моменти надходження інформації про виниклі відхилення.

Щоб уникнути конфлікту, здійснюється зміщення ліній руху за шкалою часу або зміна швидкості одного з поїздів — аж до повної зупинки. У ряді випадків використовують зміну порядку проходження поїздів (обгін). Оптимізація графіка полягає у виборі такої сукупності траєкторій, яка найкращим чином задовольняє вимогам заданого критерію. Основною проблемою поточного управління є балансування вимог пунктуальності та економічної ефективності при пропуску потоку поїздів.

Типовою ситуацією, що призводить до виникнення попутного конфлікту, є зменшення інтервалу в пакеті при розбіжності швидкості поїздів. Існують три варіанти реакції наступного поїзда на обмежувальний сигнал, які необхідні для вирішення конфлікту (рисунок 1.5) [43]:

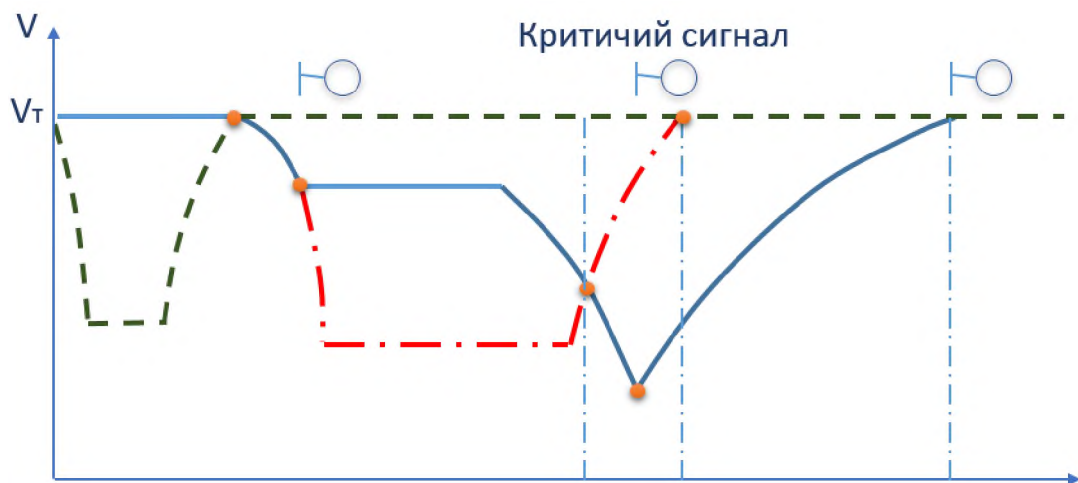


Рисунок 1.5 — Криві зміни швидкості при типових варіантах руху

- 1 максимальний режим; 2 режим «зелена хвиля»; 3 режим оптимального руху

- з використанням стандартного (максимального) режиму (крива 1 - синя);
- з використанням оптимальної (за часом) траєкторії (крива 2 - зелена);
- за енергооптимальною траєкторією (крива 3- червона).

Зустрівши жовтий сигнал, увімкнений переднім поїздом, даний (регульований) поїзд може рухатися за стандартною траєкторією 1 — з двома гальмуваннями та плавним прискоренням при вході в зону дії зеленого сигналу. Якщо ж застосувати максимальні режими гальмування та прискорення (траєкторія 2), вдається скоротити час затримки та зменшити втрату енергії.

1.6 Новий підхід до проблеми поточного управління рухом поїздів

Традиційна парадигма централізованого управління ділянкою залізниці ґрунтується на ідеї забезпечення руху всіх типів поїздів за жорстким графіком із фіксованими (нормативними) часами проходження. При цьому природними є прагнення до збільшення «твердого» ядра вантажного розкладу, підвищення швидкості руху вантажних поїздів, а також ослаблена увага до економії витрат. Такий підхід не передбачає коригування технології управління в періоди, що

характеризуються різною інтенсивністю потоку поїздів та зміненим станом інфраструктури. У рамках традиційного підходу основна вимога поточного управління рухом розуміється як безумовне (незалежне від ситуації) забезпечення нормативного часу виконання всіх операцій, як під час руху, так і під час обробки поїздів на станціях. В умовах потоку виниклих відхилень вимога неухильного дотримання нормативів, зрештою, призводить до загального високого рівня запізнень і перевитрати ресурсів.

Одним із прикладів використання традиційного підходу є технологія графіку руху поїздів, в якій адаптація руху до пульсацій вантажного вагонопотоку здійснюється шляхом призначення графіка, що включає нитки «ядра» та факультативні нитки. Розклад руху всіх поїздів по проміжних станціях приймається жорстким. Вважається, що економічний вигравш отримується від щомісячного коригування графіка вантажного руху — на відміну від діючої (річної)

Основними передумовами, що призводять до зміни парадигми поточного управління рухом поїздів, є підвищення вимог до ефективності перевезень і покращення оснащення залізниць засобами автоматизації та отримання інформації. Прогресивний підхід до розв'язання проблеми виходить із ідеї, що вимоги до часових характеристик технологічних процесів у вантажному сегменті залізничного руху мають бути гнучкими, залежними від ситуації, що складається. Поопераційні норми на перегонах і станціях повинні жорстко дотримуватися лише за невозмущених умов роботи дільниці. Якщо ж графік руху порушений, вимоги до дотримання норм мають пом'якшуватися. Тривалість операцій на станціях, розклад руху для конкретних рухомих одиниць у цих умовах встановлюється індивідуально, виходячи з вимог найбільш економічного подолання конфліктних ситуацій. Незмінною для управління рухом залишається лише вимога доставки вантажів у строки, що не спричиняють штрафних санкцій.

Таким чином, новий підхід до проблеми поточного управління рухом поїздів передбачає визнання законною варіативності операційних норм роботи ланок перевізного процесу на перегонах і станціях з метою ліквідації відхилень

від графіка або запобігання можливим відхиленням. Скориговані норми приймаються до реалізації і, крім того, слугують базою для оцінки якості функціонування ланок процесу.

Відповідно до нового підходу, реалізуються два варіанти пропуску потоку вантажних поїздів. За першим варіантом використовується жорсткий розклад у періоди, коли відбувається згущення потоку. Критерієм оптимізації при цьому слугує показник пунктуальності. Другий варіант передбачає оперативне введення особливого (енергозберігаючого) режиму зі збільшеними резервами часу ходу в тих внутрішньодобових інтервалах, коли спостерігається спад інтенсивності потоку. Результатами є зменшення кількості позаграфікових зупинок на шляху прямування та більш точне підведення поїздів до технічних (дільничних) станцій.

Такий підхід пропонується використовувати при розробці енергетично оптимальних розкладів руху поїздів для використання у заздалегідь задані періоди доби (що ефективно у приміському русі) або в міру виникнення умов. Останній варіант вводиться диспетчером при зміні поїзної (інфраструктурної) ситуації на дільниці.

З метою підвищення стійкості також запропоновано використовувати варіативний графік руху. У цей графік включають основні та резервні нитки вантажних поїздів. Дільнична швидкість на резервних нитках знижена через збільшення кількості зупинок. Технологія ГДПР є розвитком запропонованої ідеї. Поїзди «ядра» відправляються з дільничної станції у жорстко фіксовані моменти часу. Маса і довжина поїздів при цьому можуть не відповідати нормативам. Стверджується, що використання цієї технології дозволяє зменшити вплив флуктуацій кількості поїздів. Однак швидкі коливання потоку все одно призводять або до недостатнього вивозу поїздів зі станцій, або до простою локомотивів і скасування локомотивних бригад.

Можна зменшити кількість відхилень шляхом посилення технологічної (виконавської) дисципліни, але повністю їх усунути неможливо. Більш ефективним є тонке регулювання руху поїздів на дільниці залізниці, що називають

диспетчерським маневром. Свобода маневру обмежується вимогами безпеки та пропускною спроможністю системи тягового електропостачання.

1.7 Спосіб оперативної поточного управління руху

Рішення щодо врегулювання конфліктів, які приймає поїзний диспетчер, базуються на системі встановлених правил і на власному досвіді. Крім того, диспетчер керується міркуваннями комерційного плану. Можна виділити два суттєво різні способи корекції руху поїздів: груповий та індивідуальний (прицільний). Груповий спосіб орієнтований на профілактику множинних конфліктів. Одним із варіантів є введення додатків до перегінних часів. Інший варіант регулювання полягає у примусовому збільшенні інтервалу попутного слідування (для всього пакета вантажних поїздів), що створює додатковий часовий резерв. При зниженні загрози виникнення конфлікту цей резерв може бути використаний для підвищення енергоефективності.

У реальних умовах функціонування залізниці щодобово існують періоди, які характеризуються зниженням інтенсивності потоку; у ці періоди інтервал у пакеті збільшується до $T_{гр}^{под}$. Часова смуга, яку займає пакет, розширюється до значення $T_{пак}^{под}$ (рисунок 1.6,б). Збільшення інтервалу запобігає поширенню затримок по пакету поїздів. Додатковий резерв часу, що виникає при зниженні інтенсивності потоку, може бути використаний для реалізації режиму, при якому економиться енергетичний ресурс.

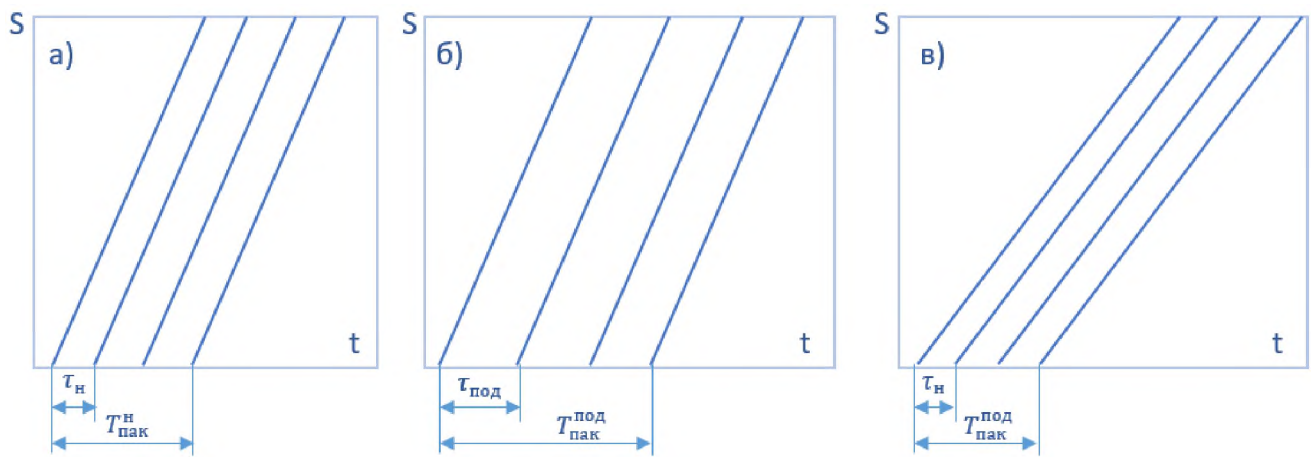


Рисунок 1.6 - Варіанти пропуску пакета вантажних поїздів по ділянці залізниці
а) за графічними нормами; б) за розрізненим графіком; в) зі збільшеним часом
ходу

Спосіб корекції графіка - збільшення часу ходу $t_{\text{под}}$ (рисунок 1.6, в) - дозволяє знизити число затримок в період, коли з'являється свобода маневра.

Дамо оцінку резерву чистого часу ходу, який виникає при реалізації повільного (економічного) режиму. Цей резерв використовується при розрішенні міжпоїздних конфліктів. Сумарний час руху $t_{\text{сум}}$ при реалізації графічного (нормативного) інтервалу становить

$$t_{\text{сум}} = Nt. \quad (1.1)$$

У випадку, якщо інтервал пакетного слідування збільшується до значення $T_{\text{гр}}^{\text{под}}$, час $T_{\text{пак}}^{\text{под}}$, по закінченню якого перегон вільний, дорівнює

$$T_{\text{пак}}^{\text{под}} = t_{\text{под}} + (N - 1)T_{\text{гр}}^{\text{под}}. \quad (1.2)$$

Припустимо, в якості оптимізуючого регулювання використовується варіант з подовженими часами ходу $t_{\text{под}}$ і вивільненим періодом T . Якщо при цьому зберегти інтервал $T_{\text{пак}}^{\text{под}}$, показник сумарної тривалості слідування всіх поїздів $t_{\text{сум}}$ збільшується до значення

$$t_{\text{сум}}^{\text{под}} = Nt_{\text{под}} + N(N - 1)(T_{\text{гр}}^{\text{под}} - T). \quad (1.2)$$

Максимальний додатковий час ходу формується при реалізації графіка з подовженими часами ходу та найбільш щільним відправленням поїздів зі станцією, коли міжпоїздний інтервал рівня $(T_{\text{гр}})$. Збільшення становить

$$t_{\text{сум}}^{\text{зб}} = N(N - 1)(T_{\text{гр}}^{\text{под}} - T_{\text{гр}}). \quad (1.2)$$

Призначення подовженого часу хода призводить до економії паливного ресурсу за рахунок використання оптимальних режимів тяги. Збільшення же інтервалу сприяє зниженню числа неграфікових затримок, що також призводить до усунення енергії. При виборі оптимального рішення необхідно враховувати той факт, що обидва зазначені види регулювання між собою конкурують; при визначеному їх поєднанні витрата енергії буде мінімальною.

Спосіб прицільного регулювання полягає в коригуванні розкладу руху окремого поїзда для виконання двох завдань:

- використання режиму підходу до точки потенційного конфлікту, що дозволяє уникнути власної затримки та (або) заощадити витрати;
- забезпечення мінімального впливу на інші поїзди.

Комплекс дій, які повинні реалізувати персонал ЦУР при використанні прогресивної технології поточного управління, можна розділити на три блоки. Перший з них (блок I) полягає у визначенні нитки графіка, в якій будуть застосовані інтенсивні або економічні режими пропуску.

Блок II передбачає визначення порядку відправлення вантажних поїздів з узлових (технічних) станцій з урахуванням їх пріоритетності - комерційної та технічної. Розглядають сценарії вимушеного очікування поїздів на станціях із-за випадкових відхилень при різних варіантах відправлення. Таким же підходом є аналогічний пошук оптимальних налаштувань в телекомунікаційній пакетній мережі.

Блок регулювання III передбачає призначення кожного поїзда або групи поїздів траєкторії руху, що оптимізована за критеріями локального результату передачі або витрати енергоресурсу. Траєкторія руху влаштовується одним із двох способів: входом поїзда, що запізнюється, в графік або призначенням такого швидкісного режиму, який мінімізує втрати. Так, наприклад, у разі короткочасної неграфіової зупинки ведучого поїзда диспетчер може цілеспрямовано назначити режим уповільнення поїзду, що прямує позаду. При цьому буде виключена зупинка цього поїзда, відповідно, і втрата паливно-енергетичного ресурсу.

Принцип превентивного регулювання передбачає також цілеспрямовану зміну швидкості вантажних поїздів і за відсутності перешкод при їх прямуванні - з метою отримання найбільшого результату. Ця підбудова проводиться в такі внутрішньодобові періоди часу, коли спостерігається спад інтенсивності потоку. Диспетчером оперативно вводяться спеціальні доданки до часу ходу з отриманням економії за рахунок використання енергозберігаючих режимів.

При адаптивному регулюванні руху поїздів у період ремонтних «вікон» графік коригується при значних відхиленнях фактичного слідування від нормативного. Недоліком такого підходу є відсутність механізму прогнозування випадкових збуджень на ділянці «вікна» та виконання профілактичних заходів щодо запобігання конфліктів між поїздами.

Визначення видів і параметрів коригуючих заходів полегшується, якщо використовується СППР, що підтримує роботу диспетчера. У цій системі автоматично генеруються варіанти траєкторій, ув'язуються з лініями ходу інших поїздів - з метою мінімізації конфліктів між поїздами. Коригування графіків здійснюється в діалоговому режимі, який організовується між диспетчером і системою інтелектуальної підтримки. Обрані рішення, перетворені в розпорядження диспетчера, передаються на станції і на локомотиви.

1.8 Оптимальний сценарій функціонування дільниці

Під оптимальним сценарієм функціонування дільниці у поточному значенні розуміємо таке поєднання різних режимів пропускання потоку поїздів, що забезпечує кращий економічний результат. Інтенсивний режим вводиться в період, коли коефіцієнт використання пропускної спроможності великий. Поточне управління в цей період спрямовано на максимально точне виконання графіка. У період, коли інтенсивність потоку знижена, може вирішуватися завдання другого плану - економії витрат на пропуск поїздів. Це стосується, в першу чергу, звичайних вантажних поїздів, більшість яких прямує по дільницям. Такий режим віднесем до виду економічних. У період економічного пропуску вводиться добавка до часу ходу за рахунок створених резервів (рисунок 1.7). Цілеспрямоване зниження швидкості на деяких елементах дільниці призводить до зменшення числа неграфіових затримок і, крім того, до економії енергії при використанні оптимальних режимів тяги.

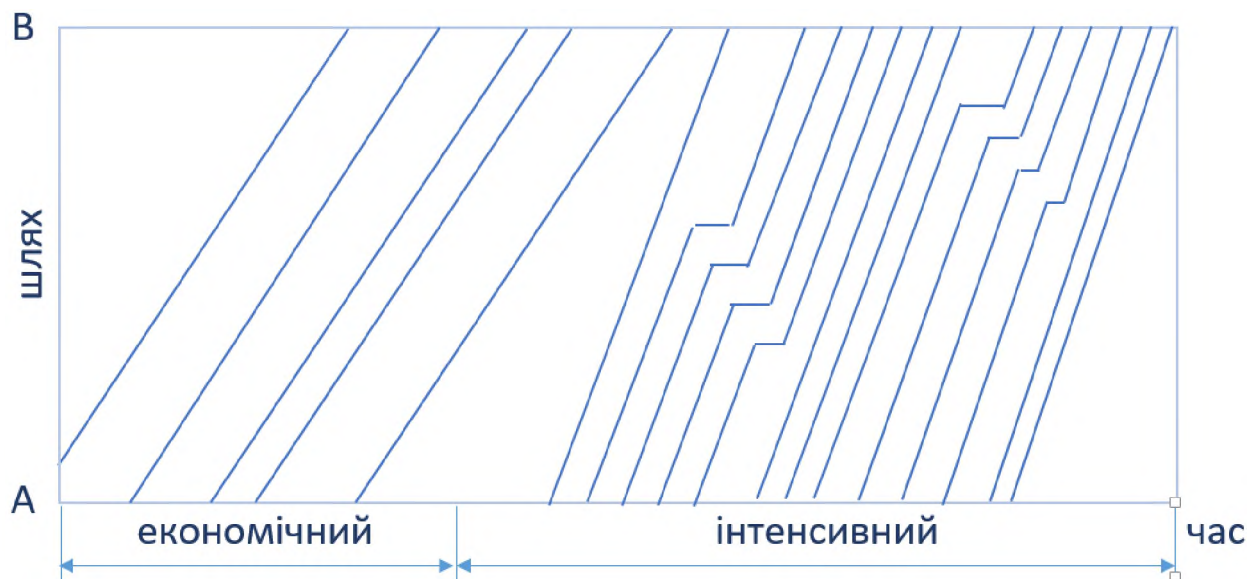


Рисунок 1.7 - Приклад використання економічного та інтенсивного режимів у гібком графіку руху вантажних поїздів

Границя, яка розділяє періоди економічного та інтенсивного пропуску вантажних поїздів, визначається з використанням результатів стохастичного моделювання [44]. Економічний режим вводиться, коли інтервал в пакеті досягає

значення $T_{\text{опт}}^{\text{ван}}$; при цьому ймовірність виникнення не менше k вторинних затримок не перевищує заданого рівня α . У реальному прикладі показано, що якщо інтервал відправлення вантажних поїздів становить 5,8 хв., то в результаті виникає чотири непланових затримки з ймовірністю 0,9.

1.9 Задача моделювання руху поїздів і коригування графіка

Коригування графіка проводиться з урахуванням прогнозу розвитку ситуації в заданому часовому і просторовому горизонтах. Детерміновані методи прогнозування будують модель руху на основі точної інформації про їх поточне місезнаходження, ходові характеристики та «вузькі» місця інфраструктури. При ймовірному прогнозуванні враховується можливість виникнення позапланових подій у плановому періоді. В основі прогнозування, крім точної інформації про поточну ситуацію, лежить сукупність статистичних характеристик відмов, отримана на основі аналізу історичних даних. Результатами розрахунку є розподіл відхилень моментів прибуття поїздів на станції. На основі цих розподілів визначаються ймовірність виникнення конфліктів, їх небезпека, а також профілактичні заходи. Основними проблемами при короткостроковому плануванні є побудова адекватної моделі руху на дільниці диспетчерського управління та вибір оптимальних регулювань.

Прямування групи поїздів по дільниці мережі, що включає технічні станції та з'єднувальні їх лінії, відображається макроскопічною моделлю. Траєкторія руху поїзда в локальних зонах - з урахуванням дискретності інфраструктури (блок-дільниць) - описується мікроскопічною моделлю. При вирішенні ряду задач управління рухом зручною формалізацією меза-модель, в якій абстрагуються деякі деталі інфраструктури та траєкторії руху поїзда (локальних прискорень та ін.).

Основна частина моделей реалізує детерміністський підхід до виявлення динамічної поїздки [16]. Кожен поїзд в моделі представлений у вигляді

матеріальної точки або нерастяжимої нитки. Детермінована модель використовує точні дані про координати поїздів і перешкод на шляху руху. При моделюванні враховуються моменти входу поїздів на дільницю, їх динамічні характеристики та поточний стан інфраструктури.

Основним недоліком детермінованих моделей, які використовуються при пошуку диспетчерських рішень, є відсутність урахування ризику виникнення випадкових збуджень. Це призводить до упущення таких регулювань, які дозволяють найкращим чином здійснити профілактику запізнені і знизити витрати. Указаний недолік у значній мірі компенсується, якщо використовувати стохастичну модель, що дозволяє прогнозувати процес виникнення випадкових затримок та їх поширення по пакету поїздів. В одній із перших робіт, що розглядають цю задачу, запропоновано аналітичний метод визначення запізнені шляхом порівняння розподілу вихідних (на вході дільниці) і знову виникаючих затримок [45]. Аналіз носить обмежений характер, так як використовується припущення про рівномірний розподіл вторинних затримок.

Існують моделі та методи розробки, які дають розклади, стійкі до відхилень у русі поїздів на локальних сегментах [46]. Методи оперативної побудови графіка орієнтовані, головним чином, на мінімізацію суммарних затримок поїздів. Використовуються прості правила диспетчерських регулювань (наприклад, «перший прибув – перший обслугований») або статичні переліки реакцій на збої [47].

Задачі оптимізації руху у загальній мережі вирішуються з великими труднощами. Алгоритми корекції графіка руху працюють неефективно в реальному часі, вимагаючи значних числових потужностей. Методологія автоматичної розробки рішень по динамічному управлінню рухом на дільниці вимагає подальшого розвитку.

Алгоритми обґрунтування коригуючих рішень побудовані на основі висновків теорій розкладів [48]. Типова методика, яка при цьому використовується, передбачає перебір усіх можливих варіантів зміни доанків часу до операційних інтервалів. Альтернативним способом реалізації стійкого графіка

є вибір визначеної сукупності стандартних рішень, які застосовуються при виникненні труднощів [25].

Основні заходи, які ефективні при підвищенні відмовостійкості залізничного графіка, запропонував М. Сагеу [49]. У подальшому він розробив комп'ютерну модель, яка використовується для тестування надійності графіків руху. Для отримання стійкого графіка, помімо оптимального розподілу додаткового часу, пропонується групувати пакети поїздів з ідентичними тяговими (і швидкісними) характеристиками.

Обмін між максимальним використанням залізничної інфраструктури та надійністю пропуску поїздів - між величинами «фізичного максимуму» та «економічної оптимальності» - є ключовим питанням у контексті оперативного управління [50]. Часто примусове зниження інтенсивності потоку вантажних поїздів практикують поїздні диспетчери. Інструкцій, регулюючих вказаний обмін, немає. Виходом є моделювання процесу, призначення коректуючих дій з урахуванням їх економічної ефективності та точного виконання диспетчерських розподілів.

Стійкість до відхилень від графіка підвищується при зменшенні інтенсивності потоку поїздів. Зниження числа поїздів в обмін на підвищення нестійкості розглядають як плату за стійкість [51]. Розроблені аналітичні вимірювачі відмовостійкості SSHR і SAHR [52], що відображають зв'язок між однородністю графіка та формою закріплення. У роботі [53] пропонується використовувати показник дисперсії розсіювання міжпоїздних інтервалів для оцінки стійкості. Комп'ютерне моделювання, проведене при розрахунку оцінок, полягає у введенні відхилень у графіку, його підготовці та визначенні ефективності нового графіка в порівнянні з вихідним. Стійкість відображається середньою затримкою поїздів із-за сукупності збоїв і часом, який необхідний для відновлення незбудженого графіка.

Передумовою використання ймовірного підходу служить завжди присутня невизначеність у структурі, поведінці системи та характеристиках її компонентів

(поїздів, елементів інфраструктури, персоналу). В цих умовах адекватною методологією є використання апарату теорії нечетких множин.

Продуктивним є підхід, при якому очікувані значення операційних часів отримуються зі статистики попередніх періодів. Для визначення цієї величини використовується ситуаційно-евристичний метод (СЕМН), який при побудові прогнозу дозволяє врахувати своєрідні умови пропуску у плановому періоді. Випадковими факторами, які призводять до розсіяння операційних часів, є:

- характеристики поїзда: маса, довжина, тип і стан локомотива;
- кваліфікація локомотивної бригади;
- характеристики дільниці: тимчасові обмеження швидкості, насиченість перегонів і станцій поїздами;
- характеристики умов видимості та погодних умов.

Слід відзначити, що спроба побудови якогось середньостатистичного графіка руху поїздів, заснованого на складеній ситуації, призводить до консервування проблем, існуючих на дільниці. Наприклад, недостатній розвиток технічної станції призводить до регулярних неграфіових зупинок поїздів на сусідніх проміжних станціях і на перегонах.

Методи комп'ютерного розрахунку оптимальних рішень за динамічним управлінням рухом поїздів, реалізовані в СППР, стали розроблятися лише в останньому десятилітті. Проблеми, які потрібно подолати розробникам, це:

- складність генерації графіка для мережі великого масштабу;
- значне число обмежень, нечіткість вихідної інформації;
- проблеми чисельного аналізу великих масивів даних.

Моделювання в процесі корекції графіка проводиться з використанням методології, розробленої в рамках теорії розкладів. Основні операції - рух і зупинка, - а також порядок їх виконання відражаються елементами направленої графа. Пошук оптимальних рішень з усунення конфліктів здійснюється, як правило, за допомогою алгоритмів змішано-цілочисленного лінійного програмування [54, 55]. Відмінною рисою більшої кількості робіт є використання виключно критеріїв, що характеризують пунктуальність руху поїздів.

В останніх публікаціях з проблеми управління на макрорівні [56, 57] пропонуються моделі спільного управління маршрутами руху та пропускною спроможністю мережі залізниць. В роботі [56] викладається ідея: при вирішенні завдань диспетчерського регулювання руху у великій мережі застосувати ієрархічне (дворівнє) управління. Локальні планувальники розробляють оптимальні рішення, прийняті до уваги обмеження, які їм видає регіональний координатор - центр макроуправління. За аналогічним принципом будується і система централізованого управління роботою сукупності («куста») залізничних станцій [32].

Розвинуті математичні моделі та методи можуть допомогти у виконанні ретроспективного аналізу стабільності та надійності графіка руху у великій мережі [58]. Метою такого дослідження є визначення критичних шляхів, необхідних резервів часу і, відповідно, ефективного способу поліпшення залізничних розкладів.

Рішення задачі виявлення графікових конфліктів у великій мережі залізниць і оптимального їх рішення вимагає наявності серйозних числових потужностей і значного розрахункового часу. Тому розвиток області оперативного аналізу йде в напрямку методів і моделей, які служать для визначення квазіоптимальних рішень для малого, прийняттого для практики, часу.

1.10 Нова меза-модель збудженого руху: дерево взаємовпливу

У моделі функціонування меза-рівня елементи інфраструктури та траєкторії руху поїздів представлені укрупнено (рисунк 1.8). У момент t_0 , що відповідає початку прогностного інтервалу, частина поїздів прямує по дільниці, деякі стоять на станціях (можливо і на перегонах).



Рисунок 1.8 - Схема руху поїздів одного напрямку по дільниці

Запропоновано новий підхід до моделювання, при якому вузли подійного графа відображають зміну (або збереження) параметрів руху кожного поїзда в ключових точках шляху [44]. До останнього можна віднести частини тимчасового обмеження швидкості, а також точки виникнення конфліктів.

Новий підхід передбачає уніфікований опис операцій руху та стоянки як елементів процесу формування тимчасової траєкторії. Побудова графа ґрунтується на упрощеній, мезоскопічній моделі передпоставлення процесу, в якому кожен вузел відповідає точці зміни швидкості при появі обмежувального сигналу.

Збуджений рух поїздів відображається у вигляді дерева взаємовпливів. Така формація являє собою граф, який відображає наявність конкуренції між поїздами для зайнятості елементів інфраструктури в конфліктних точках (операційних точках - за термінологією [59]). Обмежуваними елементами можуть бути блок-ділянки, скрещення колій тощо. Пропонована модель відрізняється від графа, який використовується в ряді робіт (наприклад, в [60]) тим, що в неї входять тільки такі точки, в яких змінюється (або відновлюється) графіковий режим. У вказаних точках або виникає конфлікт, або швидкість змінюється примусово по розпорядженню диспетчера.

Конфлікт на вхідній межі дільниці внаслідок спізненого прибуття лідуючого поїзда 1 відображається фрагментом графа, показаним на рисунку 1.9, а.

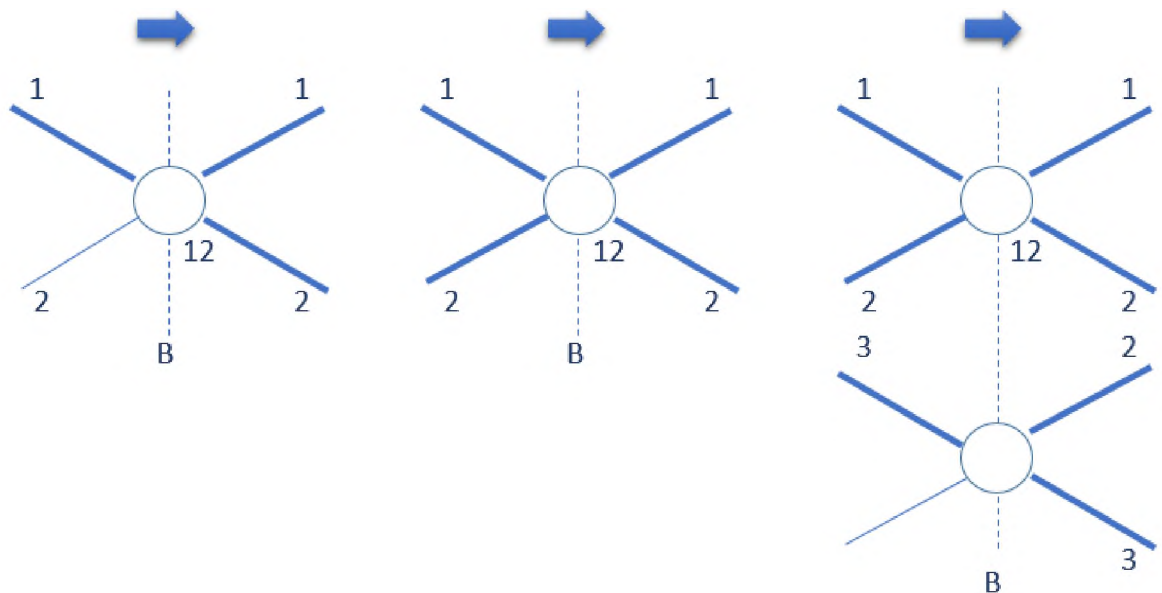


Рисунок 1.9 – Моделювання конфлікату на входній міжі дільниці

Наступний за графіком поїзд 2 отримує запознення після акта взаємодії з поїздом 1. Потовщені лінії (дуги графа) відображають операції ходу і зупинок, які реалізуються із затримками. Довжина дуги відповідає тривалості виконання операції. Варіант збереження запізнень обох поїздів після проходження станції показаний на рисунку 1.9, б. Вплив конфлікту може розповсюдитися і на наступні поїзди (наприклад, на поїзд 3; рисунок 1.9, в).

На рисунку 1.10 зображені компоненти дерева, що відповідають затримкам в налідок різниці швидкості поїздів. Правий графік демонструє розповсюдження затримок на поїзді 2 і 3 в результаті неграфікової стоянки поїзда 1; на лівому - відображений конфлікт при попутному русі в точці де поїзд більшої швидкісної категорії наздоганяє повільніший поїзд.

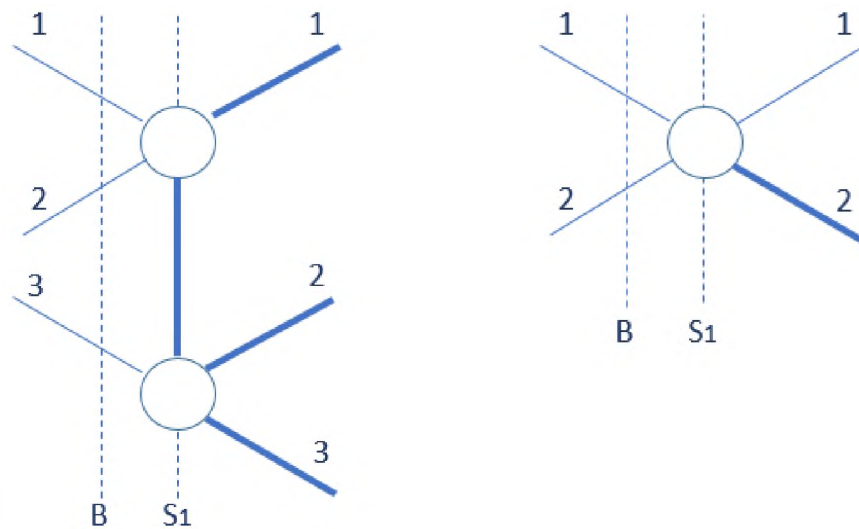


Рисунок 1.10 - Елемент, що відображає конфлікт на перегоні

У дерево взаємовпливу також включаються і узли, які відображають примосову зміну режиму руху поїздів. На рисунку 1.11, а показаний фрагмент, в якому узли відповідають точкам введення (s_1) і відміни (s_2) режиму нагону. В точці s_2 зникає запізнення поїзда завдяки руху з підвищеною швидкістю.

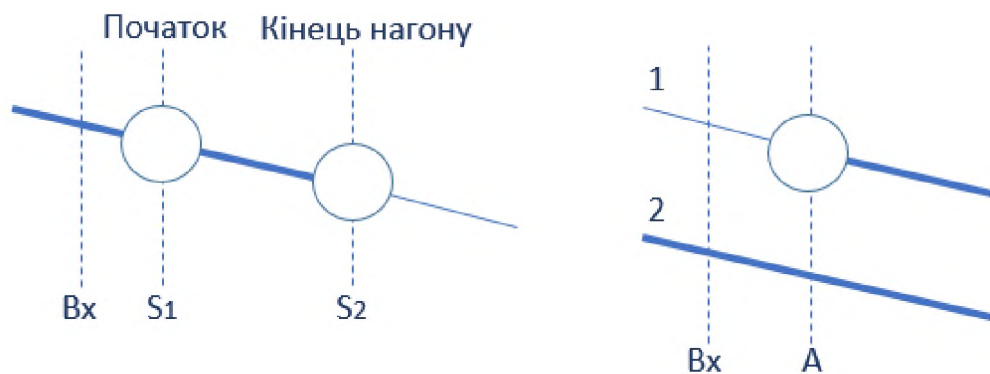


Рисунок 1.11 - Елементи дерева, що відображають зміну режиму руху
а) нагон графіка на участку $[s_1, s_2]$ б) обгон поїзда 1 поїздом 2 на станції А

На рисунку 1.11, б наведено фрагмент, що відповідає обгону на станції А поїзда 1 поїздом 2, що запізнюється. В результаті зупинки поїзд 1 отримує затримку.

Приклад, показаний на рисунку 1.12, відображає процес розповсюдження затримки мережі в результаті конфліктів різного характеру. На вхідній станції ІV

при запізненні поїзда 1 виникає конфлікт з наступним поїздом 2, який отримує вторинну затримку. Графік руху порушується, що викликає новий конфлікт, а саме, одночасно прибуті поїздів 2 і 3 до пункту А. В результаті конфлікту поїзд 3 отримує вторинну затримку. Це викликає подальше розмноження запізнень на станції В, де проводиться пересадка, - відправлення поїзда 4 з запізненням.

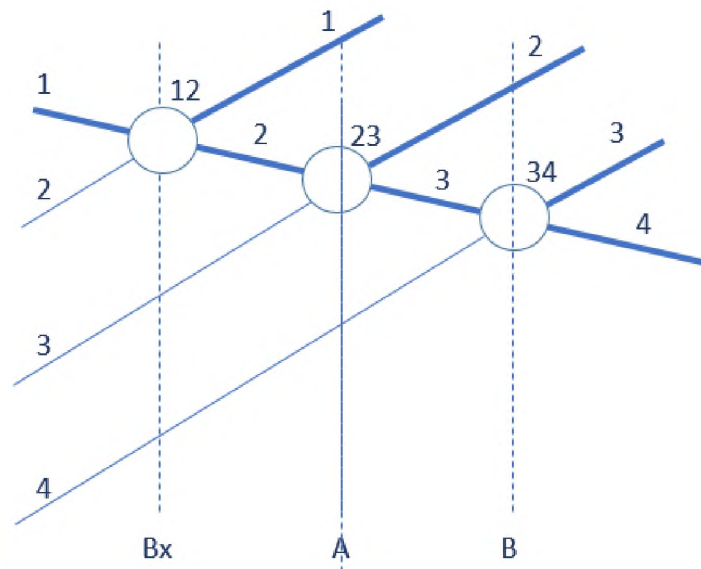


Рисунок 1.12 - Фрагмент дерева, що ілюструє розмноження опозданий на станціях і на скрещеннях

Пошук точок, в яких траєкторії викривлюються внаслідок виникнення конфліктів, проводиться шляхом вирішення ланцюга двопоїздних задач. При надходженні сигналу про фактичне виникнення відхилень від графіка визначається найближчий за часом поїзд, який може потрапити під вплив збудження. Це може бути поїзд, що йде після затриманого, або поїзд, що прибуває в точку скрещення маршрутів.

У запропонованій моделі стан k -го поїзда в конфліктній точці передбачається відхиленням τ_i^k фактичного моменту підходу поїзда від відповідного графікового моменту. Поїзд рухається по ділянці, проходячи післєдoвательно пункти з номерами i , $(i + 1)$, $(i + 2)$ тощо. У кожній із операцій набувається додаткова затримка до $\tau_{i,j+1}^k$. При слїдуванні по маршруту запізнєння

накопичуються. Це дозволяє трактувати структуру, що відображає взаємозв'язок поїздів, як дерево поточних затримок.

У процесі розрахунку визначається інтервал часу $\Delta\tau_i^0$, після якого поїзд $(k+1)$ повинен прибути точку конфлікту після поїзда k

$$\Delta\tau_i = \Delta\tau_i^0 + \tau_i^{k+1} - \tau_i^k$$

Величини τ_i^{k+1}, τ_i^k розглядаються як запізнення, накопичені поїздами на попередніх частинах маршрутів. Конфлікт виникає, коли порушується умова $\Delta\tau_i < \Delta\tau_i^k$, де $\Delta\tau_i^k$ - безпечний інтервал. Ця умова може бути записано у вигляді

$$\tau_i^{k+1} - \tau_i^k > \Delta\tau_i^{ad}$$

де $\Delta\tau_i^{ad}$ - додатковий (буферний) час, що вводиться в нормативний графік.

Заметим, что интервал $\Delta\tau_i$ в процесі побудови прогнозу носить характер випадкової величини. При моделюванні кожної потенційно конфліктної точки розраховується ймовірне розподіл затримки на основі совокупності часу всіх попередніх операцій. При заданій межі, визначеній запізненням, розраховується ймовірність виникнення конфлікту. Розгалуження дерева припиняється в тих вузлах, де ймовірність конфлікту визнається зникаюче малою.

1.11 Вирішення задач поточного планування і управління рухом поїздів

Аналіз літературних джерел, проведений в рамках дисертаційної роботи, дозволив представити ієрархію завдань поточного управління рухом (рисунок 1.13) і виділити напрямки, необхідні поглибленої розробки [44].



Рисунок 1.13 – Класифікація задач поточного планування і управління рухом поїздів

Дослідження показало, що основними напрямками удосконалення поїздного диспетчерського управління є корекція графіка в режимі реального часу та чітке виконання запланованих заходів. Пріоритетні задачі виділені на рисунку жовтим кольором. Найбільш ефективними визнаються напрямки превентивного регулювання і стимулювання персоналу.

Основною проблемою, яка передбачає реалізацію якісного поточного планування руху поїздів, є розробка коригувального графіку з урахуванням реальної складеної поїздної та інфраструктурної ситуації. Рішення по переплануванню повинні забезпечувати підвищення пунктуальності руху, ступінь використання пропускнуєї спроможності та економічну ефективність. Тому ставиться завдання: оцінити можливість побудови комп'ютерної моделі та пошук сукупності оптимальних режимів регулювання руху поїздів на ділянці за визначений час. При вирішенні цієї задачі необхідно провести аналіз методики побудови детермінованих і стохастичних моделей процесу, а також питання пошуку оптимальних рішень по його корекції.

У процесі аналізу також визначено, що існуючі критерії оптимізації в недостатній мірі відображають специфіку змішаного вантажопасажирського руху. Тому завдання визначення нових критеріїв (економічного, енергетичного), які враховують задану специфіку та орієнтовані на гнучке управління, підлягає дослідженню та вирішенню.

У системах інтелектуальної підтримки роботи диспетчерського персоналу недостатньо використовуються методи, розроблені в рамках теорії дослідження операцій, і когнітивні методи. У роботі ставляться завдання: залучити методи аналізу ієрархії, ігрових моделей до визначення керованих рішень у діалозі людина-машина. Крім того, необхідно запропонувати нові способи стимулювання диспетчерського персоналу для підвищення ефективності поточного планування та управління, а також оцінки результатів його діяльності.

2 Аналіз показників експлуатаційної роботи на залізницях України та Європи

2.1 Аналіз показників міжнародних вантажних перевезень в Україні

До міжнародних перевезень відносять такі види перевезень, як експорт, імпорт та транзитні перевезення. На сьогоднішній день міжнародні вантажні перевезення в Україні займають значну частину загального об'єму перевезень.

За 2025 рік було перевезено 161,31 млн. тонн вантажів. У міжнародному сполученні було перевезено 83,8 млн. тонн, що становить 52% від загального об'єму перевезень за цей період (рисунк 2.1) [61].

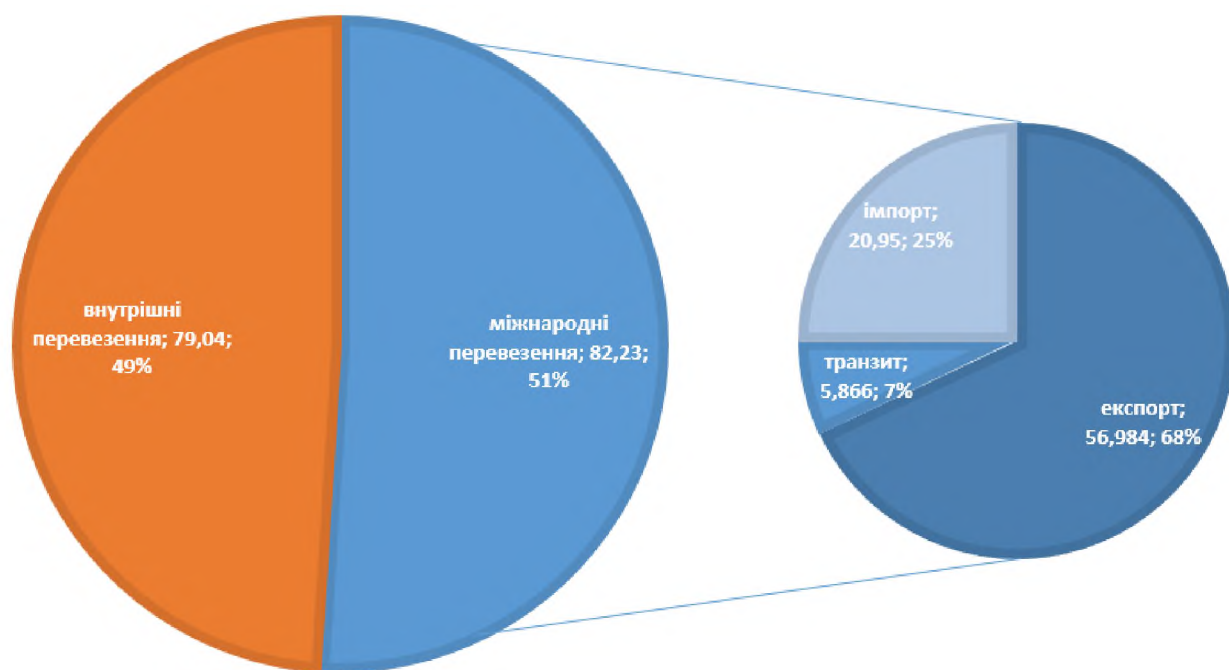


Рисунок 2.1 – Діаграма обсягів перевезених вантажів за 2025 рік

Вантажообіг 2025 рік склав 99083,77 млн. т-км. Частина міжнародних перевезень у цьому показнику склала 63 % – 62422,7751 млн. т-км(рисунк 2.2) [61].

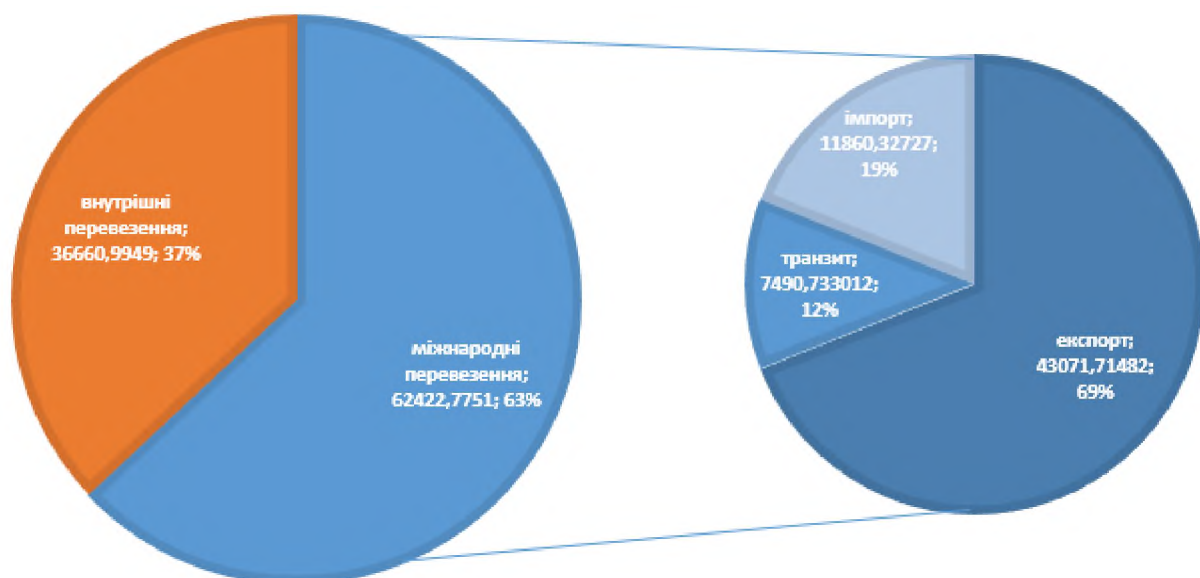


Рисунок 2.2 – Діаграма вантажообігу за 2025 року

Отже міжнародні перевезення займають важливу частину вантажних перевезень в Україні.

Якщо розглядати динаміку зміни загальних обсягів перевезених вантажів починаючи з I півріччя 2018 року, то ситуація нестабільна, адже обсяги постійно змінюються, немає стабільного росту цих показників. У I півріччі 2020 року відбувалося зниження обсягів перевезених вантажів через обмеження пов'язані з COVID-19, а у I півріччі 2021 року – відбулося зростання (рисунок 2.3). Однак з початком воєнних дій у I півріччі 2022 року різко змінився обсяг перевезення (майже у 2 раз). Для перевезень міжнародного сполучення за цей же з 2018 по 2022 проглядається спадаюча тенденція, водночас, починаючи з 2022 року, обсяг саме перевезення у міжнародному сполученні зросли на 25-27% [61].

2.2 Аналіз показників пунктуальності у країнах Європи

Пунктуальність у залізничних операціях, як і загалом на транспорті, означає відповідність запланованого або раніше опублікованого часу

відправлення та прибуття (розкладу) фактично досягнутого часу прибуття та відправлення.

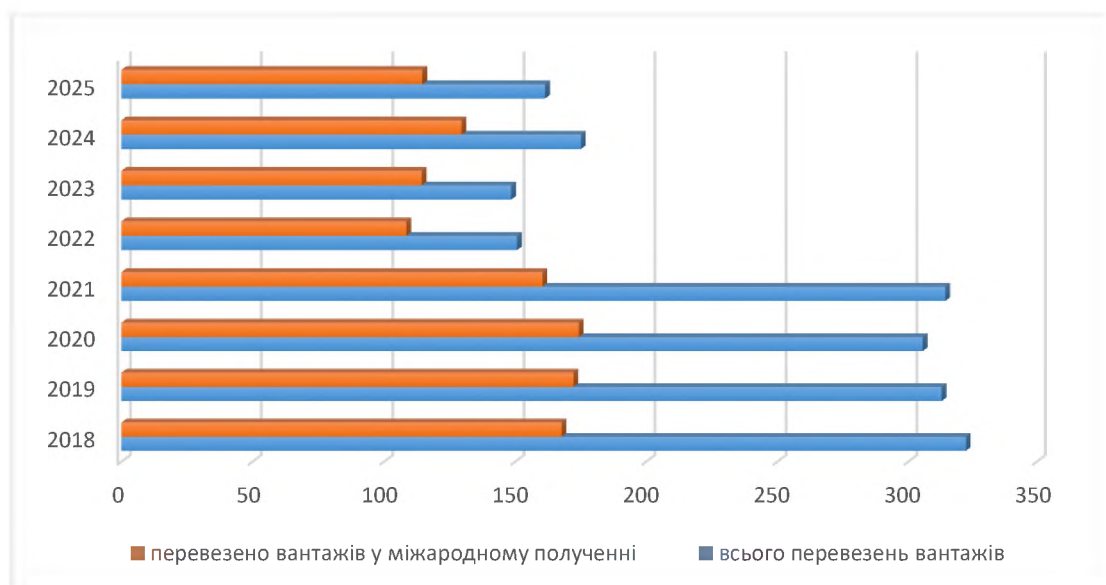


Рисунок 2.3 – Динаміка зміни обсягів перевезених вантажів за 2018-2025 рр

Тенденція коливання показників у міжнародних перевезеннях прослідковується і у динаміці вантажообороту (рисунок 2.4) [61].

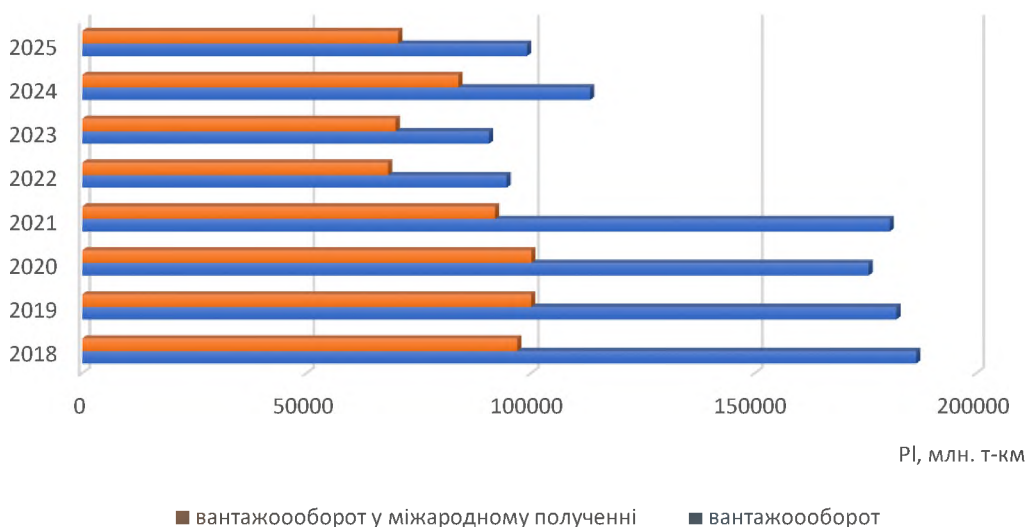


Рисунок 2.4 – Динаміка зміни вантажообороту за 2018-2025 рр

Показник ефективності громадського транспорту (PPM), куди входить і залізниця – це відсоток поїздів, які прибувають до кінцевого пункту призначення

протягом від 5 або 10 хвилин від запланованого часу прибуття, залежно від типу залізничного оператора, що надає послугу.

В першому кварталі (з 1 січня по 31 березня 2025 року) PPM для операторів Великої Британії становив 86,8%.

Цей показник не змінився порівняно з тим самим кварталом попереднього року (рисунок 2.5) [62].

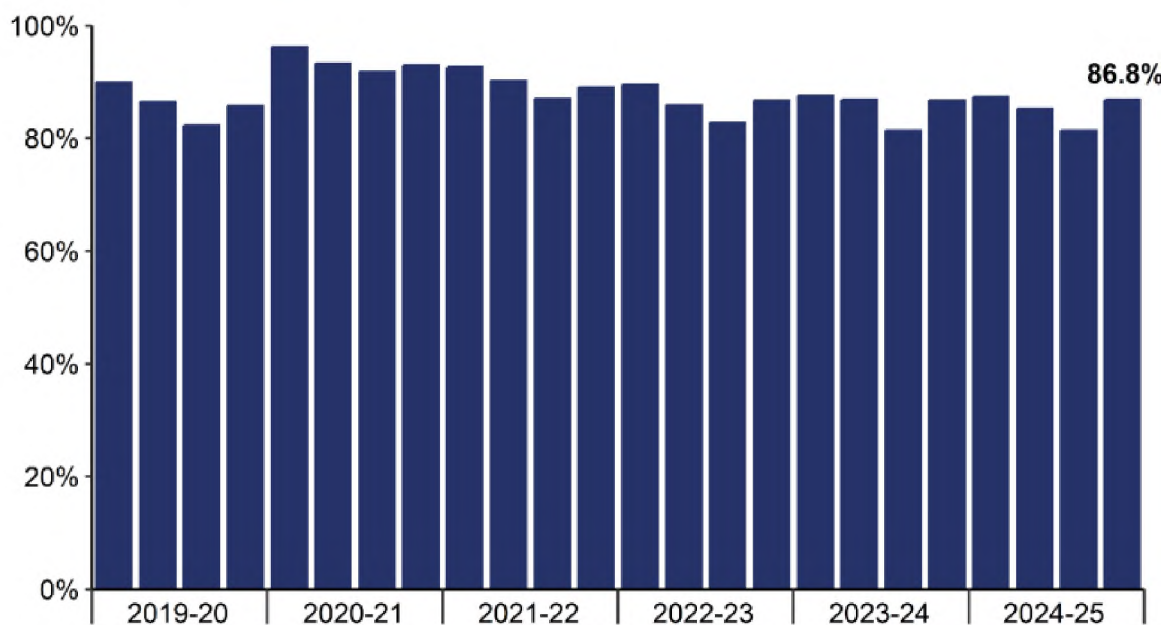


Рисунок 2.5 – Показник PPM Великобританії з 2019 по 2025 рік (щоквартально)

В останньому кварталі (з 1 січня по 31 березня 2025 року) пунктуальність покращилася у 11 з 24 операторів, причому відсоток своєчасності був вищим, ніж у тому ж кварталі попереднього року.

Компанія West Midlands Trains зафіксувала найбільше зростання відсотка своєчасності порівняно з тим самим кварталом попереднього року (на 4,0 пункти), тоді як лінія Elizabeth зафіксувала найбільше зниження (на 7,3 пункти) [63] (рисунок 2.6).

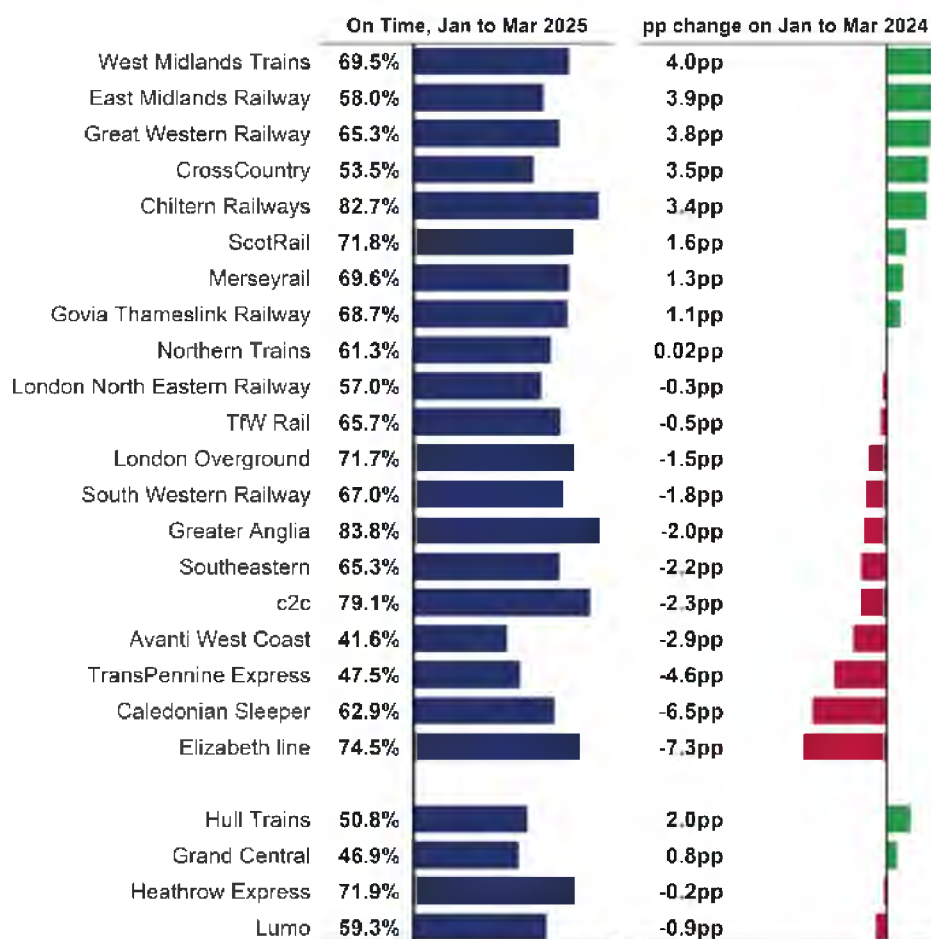


Рисунок 2.6 – Виконання показника пунктуальності різними операторами у Великій Британії за I квартал 2025 порівняно з аналогічним періодом 2024 року [63]

Країни Європи постійно працюють над покращенням цього показника.

За даними портала [64] пунктуальність в різних країнах Європи коливається. Так країною з максимально своєчасним прибуттям є Швейцарія, а найнижчий показник має Німеччина (рисунок 2.7).

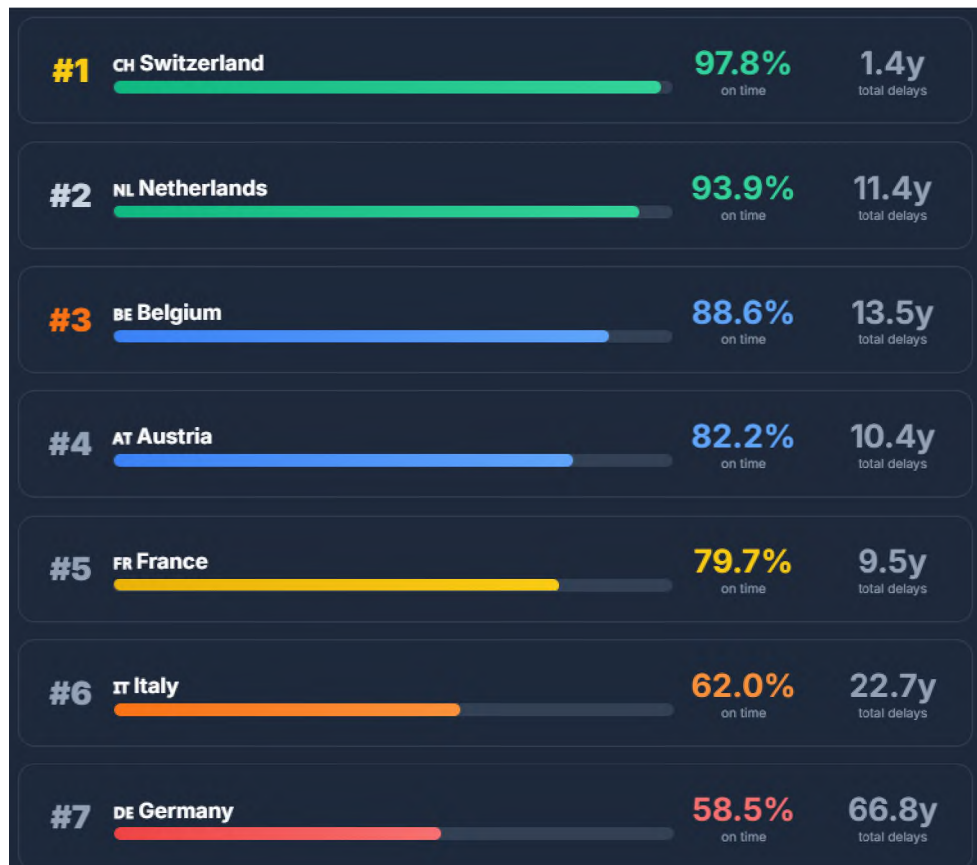


Рисунок 2.7 – Загальне запізнення поїздів а мережі залізниць – країн ЄС

За даними 2025 року, більшість країн покращили показники пунктуальності вантажних послуг порівняно з 2024 р. (рисунок 2.8) [65].

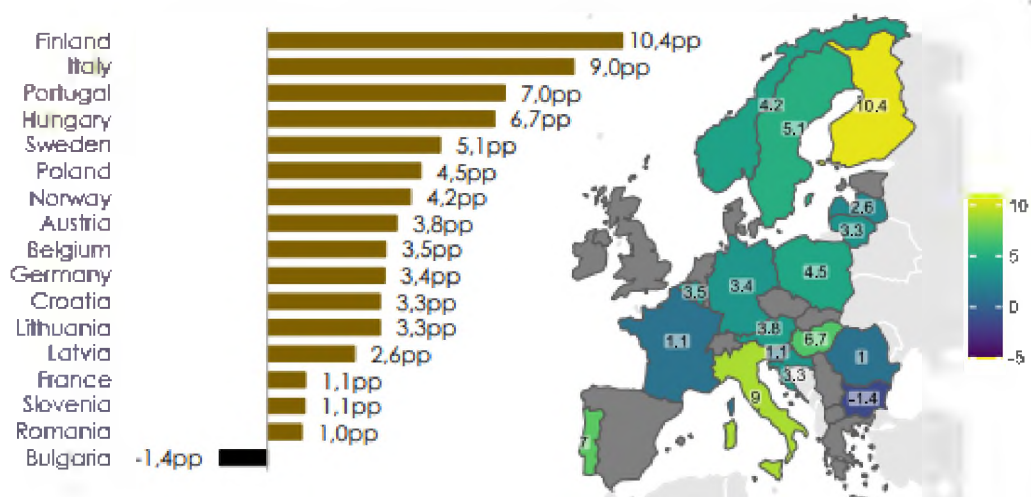


Рисунок 2.8 – Зміна показника пунктуальності у країнах Європи за 2025 рік у порівнянні з 2024роком

Країни використовують різні порогові значення пунктуальності в межах від 5 до 60 хвилин від запланованого часу прибуття. Наприклад, порогові значення для Швеції – 5 хв. 59 с.; для Німеччини та Португалії – 15 хв.; Польща – 15 хв. 59 с.; для Австрії та Бельгії – 30 хв.; для Румунії та Іспанії – 60 хв. Ці відмінності не впливають на аналіз, оскільки в обидва роки використовувалися однакові порогові значення.

Найбільше покращення пунктуальності було у Фінляндії, де показник збільшився з 71,8% у 2019 року до 82,2% у 2020 році. Слід зазначити, що Фінляндія отримала збільшення пунктуальності термінів доставки вантажу в січні та лютому, отже, ці покращення з року в рік не можуть бути виключно пов'язано з наслідками пандемії. Були й помітні покращення в Італії, Португалії та Угорщині.

Звісно, скорочення вантажних послуг, пов'язаних із пандемією і подальша стабілізація, призвели до покращення пунктуальності. Оскільки кількість поїздів на залізничній мережі була зменшена, було й менше перевантажень мережі та знизилась кількість конфліктів між маршрутами поїздів. Зі зменшенням об'ємів пасажирських перевезень, вантажні послуги були пріоритетними в деяких країнах.

Розглядаючи місячні зміни показників пунктуальності (рисунок 2.9) можна побачити, що більшість країн покращила терміни доставки вантажів, що пов'язано з початком пандемії. Хоча позитивні зміни також простежуються з січня по березень, такі підвищення не можуть бути віднесені до пандемії, адже вони передували введення обмежуючих заходів пов'язаних з COVID-19 [65].

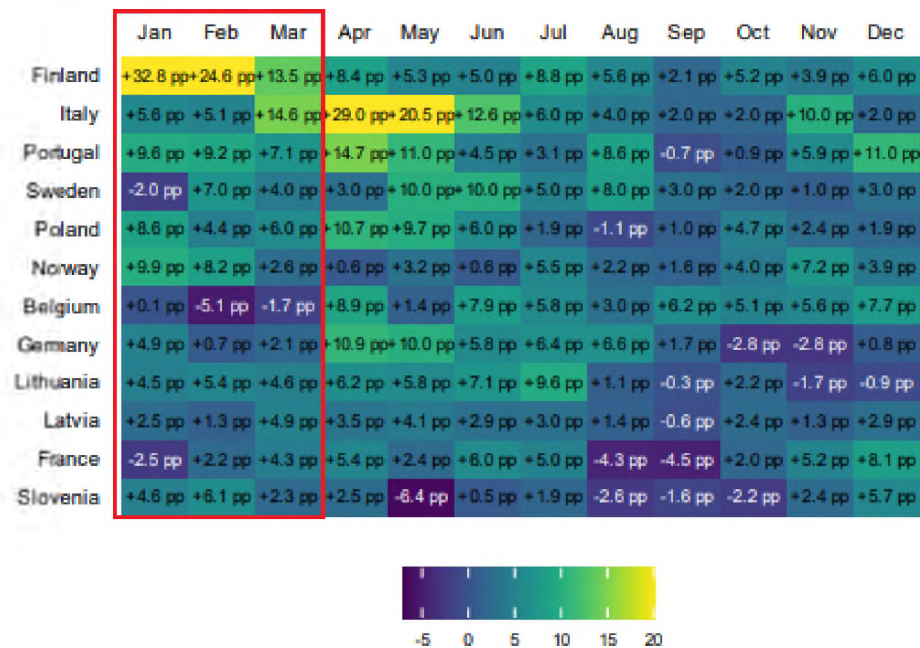


Рисунок 2.9 – Місячні зміни показника пунктуальності країн Європи за 2020 рік у порівнянні з 2019 роком

Беззаперечним лідером Європи у термінах доставки вантажів є Швейцарія.

За даними компанії, у 2025 році SBB зафіксувала пунктуальність пасажирських поїздів на рівні 94,1% — це найвищий річний показник за всю історію існування оператора.

Найпунктуальнішим днем року став 28 грудня 2025 року, коли 98,6% поїздів прибули вчасно. Протягом року SBB запустила близько 1600 додаткових поїздів для обслуговування великих заходів, зокрема «Євробачення» та Чемпіонату Європи з футболу серед жінок, а також впоралася з великими роботами, такими як закриття лінії Берн–Фрібур (рисунок 2.10) [66].

SBB пов'язує загальний результат із готовністю персоналу, надійністю поїздів та інфраструктури, а також сприятливими погодними умовами восени 2025 року. Пунктуальність пересадок досягла 98,6%, що дещо нижче за 98,7%, зафіксованих у 2024 році, тоді як рівень задоволеності клієнтів залишився стабільним.

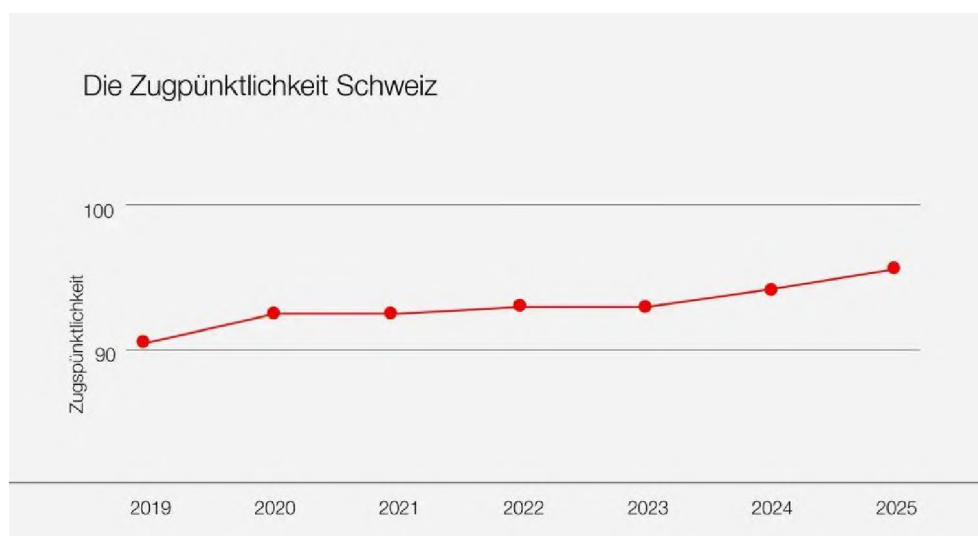


Рисунок 2.10 – Пунктуальність прибуття пасажирських поїздів а Швейцарських залізницях за період з 2019 по 2025 роки

Результати по регіонах відрізнялися. У Тічино пунктуальність знизилася до 92,1%, порівняно з 92,6% у 2024 році. SBB вказала на затримки у транскордонних перевезеннях з Італії, страйки на італійській мережі та будівельні роботи в районі Лугано–Меліде. Тимчасове закриття лінії Сімплон, яке призвело до перенаправлення вантажних перевезень через Готардську вісь та збільшення обсягів руху поїздів у Готардському базовому тунелі, також вплинуло на роботу.

У західній Швейцарії пунктуальність покращилася до 93,4%, порівняно з 91,9% у 2024 році та 89,2% у 2023 році. Пунктуальність пересадок у регіоні сягнула 98,9%, що перевищує середній показник по країні. SBB пов'язала це покращення зі змінами розкладу, запровадженими у 2025 році для підвищення надійності системи.

Показники вантажних перевезень також покращилися. SBB Cargo Switzerland повідомила про пунктуальність для клієнтів на рівні 90,2% у 2025 році, що на 2,2 процентних пункти вище, ніж у попередньому році. Оператор назвав одним із факторів, що сприяли цьому, заходи, спрямовані на підвищення продуктивності на сортувальній станції в Лозанні, незважаючи на постійну нестачу персоналу [66] .

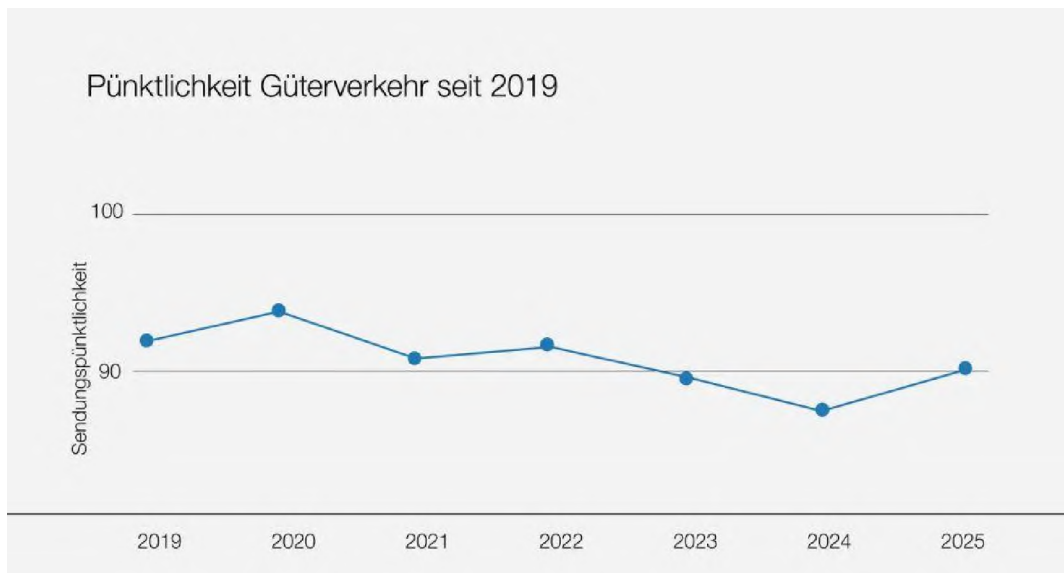


Рисунок 2.11 – Пунктуальність прибуття вантажних поїздів а Швейцарських залізницях за період з 2019 по 2025 роки

Міжнародні пасажирські перевезення продовжували впливати на загальні показники роботи. Затримки поїздів, що прибували з Німеччини, залишалися джерелом перебоїв, що позначалося на внутрішніх перевезеннях. Компанія SBB повідомила, що впорається з цією проблемою, повертаючи поїзди назад на кордоні за необхідності та організовуючи замісне сполучення на території Швейцарії.

За даними видання BILD, у 2025 році німецькі залізничні перевезення пасажирів на далекі відстані продемонстрували найгірші показники пунктуальності за всю історію. Газета посилається на інформацію, згідно з якою річний рівень пунктуальності поїздів «Deutsche Bahn» на далеких маршрутах склав лише 60,1%, що є зниженням порівняно з 62,5% у 2024 році [67].

Протягом року показники ще більше погіршилися: у жовтні 2025 року лише приблизно кожен другий поїзд далекого прямування прибув до пункту призначення вчасно.

Зниження пунктуальності пов'язане насамперед із поєднанням структурних проблем у залізничній мережі та масштабними будівельними роботами. Масштабні роботи з оновлення коридорів та проекти модернізації мережі

призвели до численних тимчасових обмежень швидкості та закриття ліній, що створило додатковий тиск на стабільність розкладу руху.

Водночас тривалий дефіцит інфраструктури продовжує негативно позначатися на надійності експлуатації. Роки недостатнього фінансування призвели до зростання кількості відмов у роботі таких критично важливих об'єктів, як стрілочні переводи, колійна інфраструктура та системи сигналізації, що підвищує ймовірність перебоїв у роботі мережі міжміських перевезень.

Представник Deutsche Bahn підтвердив низькі показники пунктуальності у 2025 році, зазначивши, що не слід очікувати швидких покращень. Компанія вказала, що вступає у новий етап, спрямований на відновлення надійності та якості обслуговування пасажирів.

Федеральний уряд Німеччини планує інвестувати 23 млрд євро в залізничну інфраструктуру лише у 2026 році, а до 2029 року на модернізацію та оновлення колій, станцій та цифрових систем виділено 107 млрд євро. Окрім інвестицій, ініціював внутрішні реформи, включаючи зміни в керівництві та спрощення виконавчої структури, оскільки Deutsche Bahn прагне змінити тенденцію до погіршення пунктуальності на далеких маршрутах.

У сусідній Польщі також простежуються позитивні зміни у термінах доставки вантажів. Якщо розглянути статистику починаючи з 2018 року (рисунк 2.12), то бачимо що показники пунктуальності покращуються кожного року [68].

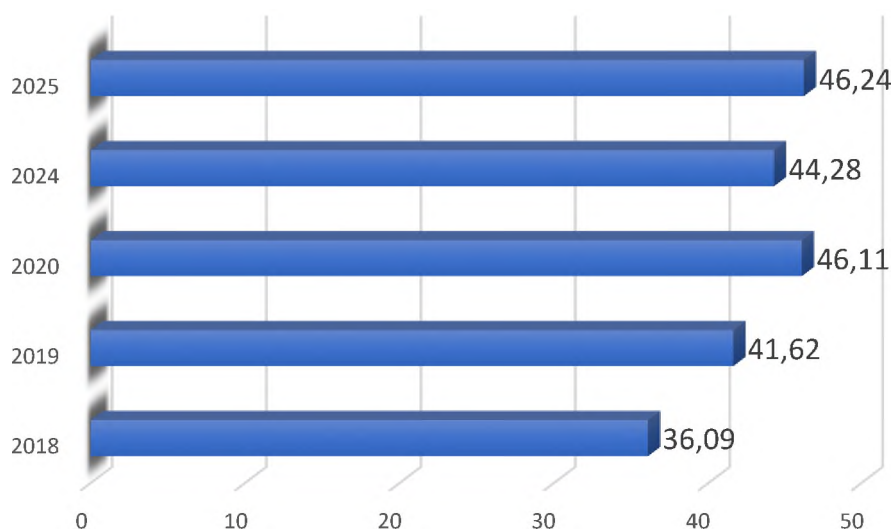


Рисунок 2.12 – Статистика показників пунктуальності з офіційного сайту РКР

За результатами першого півріччя 2025 року пунктуальність поїздів внутрішнього сполучення в Україні становила 92%. Про це повідомила «Укрзалізниця» [69]. Українським залізничникам вдалося утримати цей показник, незважаючи на обстріли інфраструктури, перебої з електроенергією, які вимагали оперативного переходу на дизельну тягу, а також у період активних ремонтів інфраструктури та «ремонтних вікон». У міжнародному сполученні показники пунктуальності виявилися нижчими, адже низка факторів не залежить від Укрзалізниці.

Отже для залучення нових партнерів для співробітництва та у зв'язку з Євроінтеграцією Україна має працювати над покращеннями показників термінів доставки вантажу, адже країна має великий потенціал у міжнародних перевезеннях, завдяки своєму географічному розташуванню.

3 Коригування графіку руху стохастичний підхід

3.1 Узагальнена стохастична модель руху поїздів

Під час формування та руху потоку поїздів регулярно виникають непланові відхилення, що мають випадковий характер. Пошук оптимального управління в умовах наявності збурень стає ймовірнісною задачею. Результат управління апріорі вважається наближенням через відсутність повних вихідних даних та недосконалість системи регулювання.

Щоб визначити ефективні заходи компенсації відхилень та профілактичні заходи щодо їх запобігання, необхідно побудувати адекватну прогнозну модель розвитку процесу. При стохастичному прогнозуванні враховується, крім точної інформації про поточну ситуацію, ймовірність виникнення перешкод та статистика відхилень операційних часів, отриманих на основі аналізу історичних даних. Результатами розрахунку є розподіли відхилень моментів прибуття поїздів у ключові пункти (зокрема, на станції графікових зупинок) або інтервалів руху поїздів. На основі аналізу розподілів визначаються місця конфліктів, оцінюється ефективність регулювань.

Базовим елементом процесу ймовірнісного прогнозування розвитку ситуації на дільниці є двопоїзна стохастична модель руху [70, 49]. Аналіз взаємодії пари поїздів, виконаний у попередніх дослідженнях, не дозволяє виявити закономірності в русі щільного потоку. Крім того, у відомих роботах відсутній облік механізму безперервного регулювання швидкісної траєкторії, яке здійснює машиніст. Все це вимагає вдосконалення стохастичної моделі руху поїздів.

Випадкові відхилення від графіка викликаються змінами фізичних характеристик поїзда (тягового потенціалу, опору руху тощо) та своєрідністю умов його пропуску на дільниці. На флюктуації швидкості також впливають кваліфікація, стиль роботи машиніста та алгоритм, що реалізується системою

автокерування. Траєкторії руху формуються двома групами факторів, перша з яких впливає на кожен окремий поїзд, незалежно від впливу інших поїздів. Опис цього процесу здійснюється за допомогою однопоїзної моделі. До другої групи належать випадкові затримки, які впливають на інші поїзди. Основою для оцінки взаємовпливу поїздів у потоці є двопоїзна модель.

Запропонована узагальнена однопоїзна модель описує відхилення, спричинені збурювальними чинниками. На **рисунку** 3.1 показано графічну інтерпретацію механізму формування відхилень при прибутті на кінцеву станцію С. Поїзд прибуває на вхідну станцію А із запізненням у момент $\bar{T}^A$

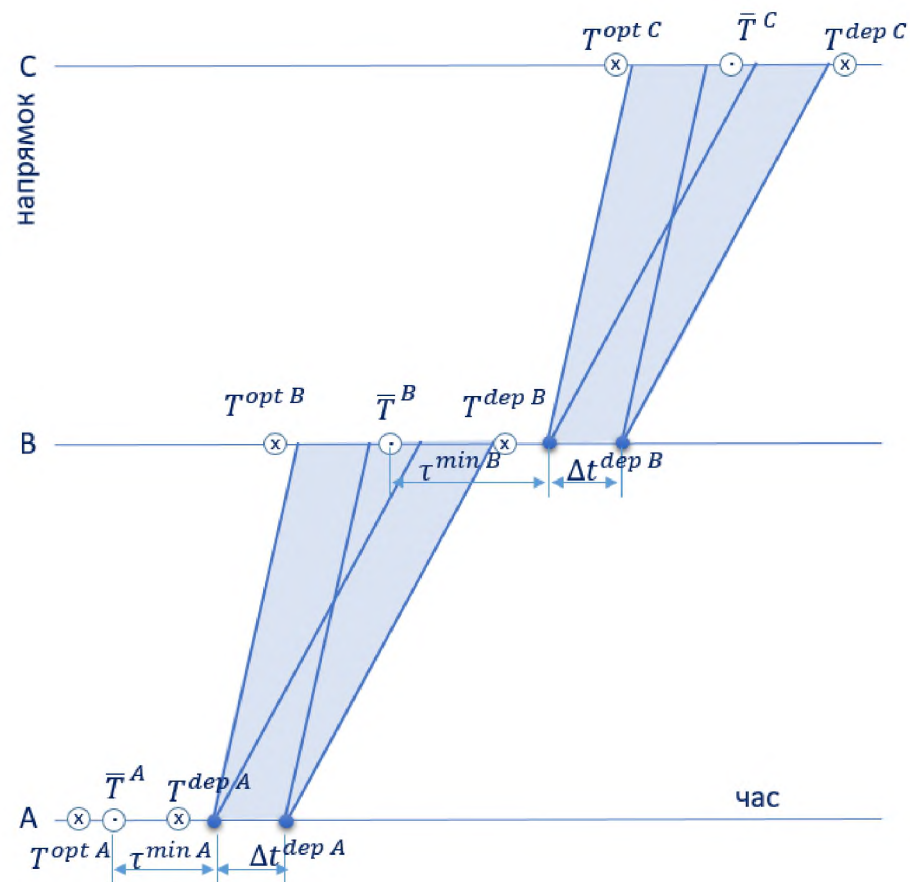


Рисунок 3.1 - Механізми формування часу прибуття поїзда

- ⊗ - графікові моменти відправлення та прибуття;
- ⊙ - прогнозовані моменти прибуття (середні значення)

Поїзд відправляється на ділянку після закінчення мінімального інтервалу τ_{min}^A . Відправлення поїзда може додатково затриматися під впливом випадкових

факторів (зокрема, через процес висадки/посадки пасажирів). Розсіювання додаткової затримки умовно зображено інтервалом $\Delta t^{opt A}$.

Час проходження на ділянці колії АВ піддається випадковим впливам, що призводить до розсіювання моментів прибуття на станцію В. На графіку це відображено у вигляді «пакета» ліній руху поїздів. Поїзд може бути відправлений зі станції В через певний час, який залежить від станційних операцій. Момент відправлення також є випадковою величиною, що відображено на графіку інтервалом $\Delta t^{opt B}$. Випадковий характер руху на ділянці ВС призводить до додаткового розсіювання моментів прибуття на станцію С. Показано [71], що розрахунок характеристики розсіювання моментів прибуття на кінцеву станцію ґрунтується на багаторазовому використанні операції згортки розподілів випадкових величин, що характеризують кожен з елементів траєкторії.

При оперативному управлінні рухом диспетчер у кожній ситуації приймає рішення, зосереджуючи свою увагу на парі поїздів, які можуть бути залучені до конфлікту. В основу прийняття регульовального рішення кладеться двопоїзна модель. Ця модель включає поїзд, який зазнає первинної затримки (лідерський), та інший поїзд, який піддається впливу первинної затримки (наступний).

Вихідними даними для побудови узагальненої моделі є:

- нормативний розклад руху, мінімальні часи руху, зупинок та інтервали пересадки (на станціях пересадки пасажирів);
- безпечні мінімальні інтервали між поїздами;
- моменти фактичного прибуття поїздів на дільницю;
- актуальні обмеження швидкості, стан погоди;
- характеристики розсіювання операційних часів (руху та зупинок).

Розглянемо базовий сценарій руху пари поїздів одного напрямку з малим інтервалом на ділянці АВ. Припустимо, поїзд №1 відправляється із запізненням $\Delta t_1^{opt A}$ зі вхідної станції ділянки А, величина затримки детермінована. На ділянці проходження до наступної станції В реалізується одна з траєкторій, що входять до «віяла» ліній руху (рисуюнок 3.2).

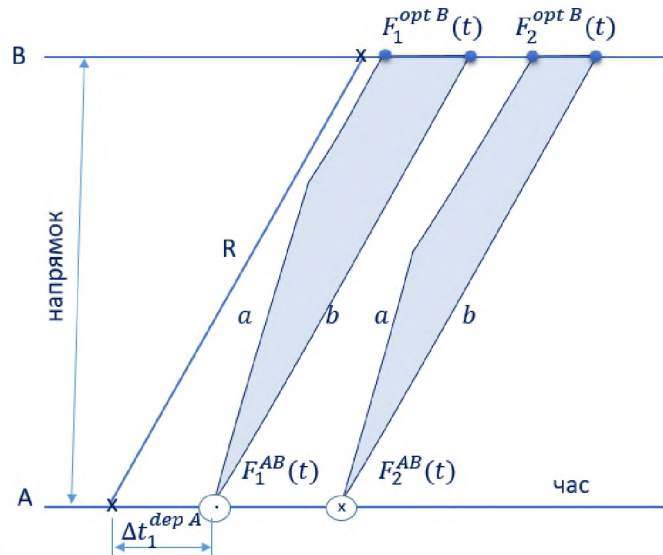


Рисунок 3.2 - Модель взаємодії поїздів попутного руху

Розподіл $F_1^{AB}(t)$ зумовлений неконтрольованими факторами (станом техніки, погодою) та роботою машиніста. У деяких випадках час ходу збільшено відносно нормативного (траєкторія (b)), в інших зменшено — застосовано режим нагону (траєкторія (a)). В останньому випадку система керування (машиніст) знизить швидкість, досягнувши певної точки шляху R. Розподіл моментів прибуття описується функцією $F_1^{arrB}(t)$.

Припустимо, поїзд №2 відправляється зі станції A, час його руху розподілено за законом $F_2^{AB}(t)$. Існує ймовірність, що при прискореному русі поїзд №2 наблизиться на мінімальну безпечну відстань. Система безпеки спрацює таким чином, що подальший рух поїзда сповільниться (режим «руху по віддаленню»). Розподіл моментів прибуття поїзда $F_2^{arrB}(t)$ зміниться; він сформується двома величинами часу руху, а також залежить від вхідного запізнення $\Delta t_1^{opt A}$. Типовим сценарієм також є виникнення затримки поїзда №2 на перегоні (**рисунок 3.3, а**) внаслідок позапланової зупинки поїзда-лідера. Тривалість первинної зупинки характеризується розподілом $F_1^d(t)$. Після усунення перешкоди рух продовжиться. **Рисунок 3.3, б** відображає сценарій руху пари поїздів по дільниці ABC з графіковими зупинками на станціях. Якщо поїзд №2 слідує за поїздом №1, що запізнюється, багаторазово виникає ситуація «руху по віддаленню».

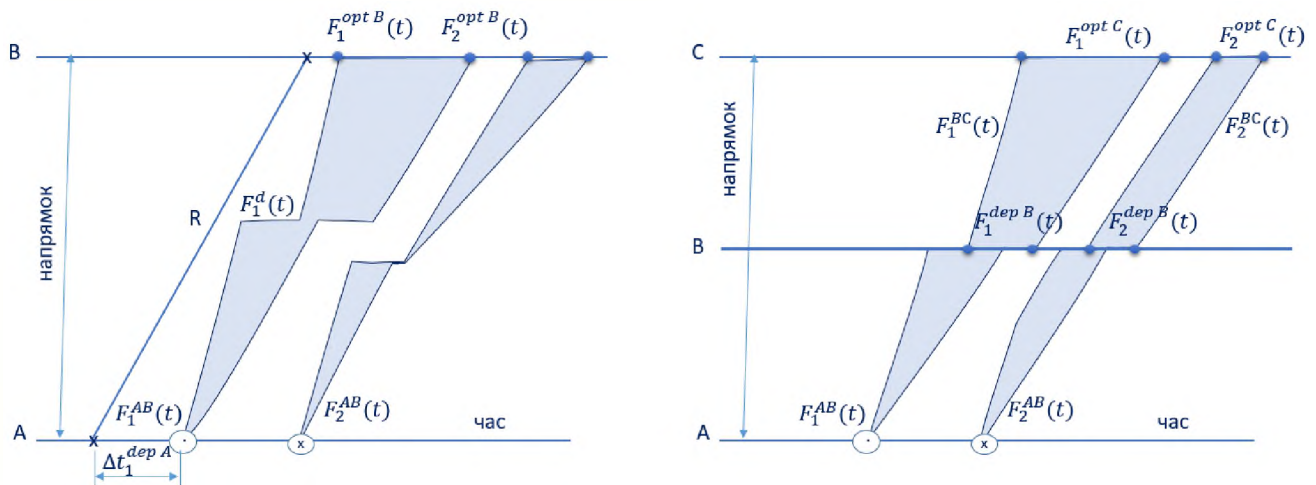


Рисунок 3.3 — Графічна інтерпретація руху пари поїздів із зупинкою
(а) на перегоні та (б) на станції

Диспетчер скорочує тривалість зупинок, що призводить до звуження інтервалу розсіювання моментів прибуття на кінцеву станцію. Регулюючі впливи з боку машиніста також призводять до скорочення зони розсіювання. У формуванні часу прибуття поїзда №2 на станцію *C* беруть участь шість компонентів: чотири величини, що відображають варіації часу руху, та дві випадкові величини, зумовлені регулюючими впливами на поїзди під час їх відправлення зі станції *B*.

3.2 Базова модель формування інтервалів прибуття поїздів

Завданням моделювання є визначення інтервалу відправлення, при якому ймовірна поява заданої кількості затримок поїздів. Механізм формування затримок відображено на **рисунку 3.4**. Припускаємо, що інтервали між поїздами в пакеті при відправленні зі ст. *A* розсіянні. Поїзд-лідер 1 здійснює на перегоні короточасну позапланову зупинку, яка має випадкову тривалість τ_1 . При щільному русі наступний поїзд також змушений зупинитися; рушає негайно після того, як лідер відновлює рух. Такому ж впливу піддаються й інші поїзди, що трактується як процес розмноження затримок. Фази уповільнення та прискорення

під час виконання зупинок враховувати не будемо, це не впливає на загальність розв'язання задачі.

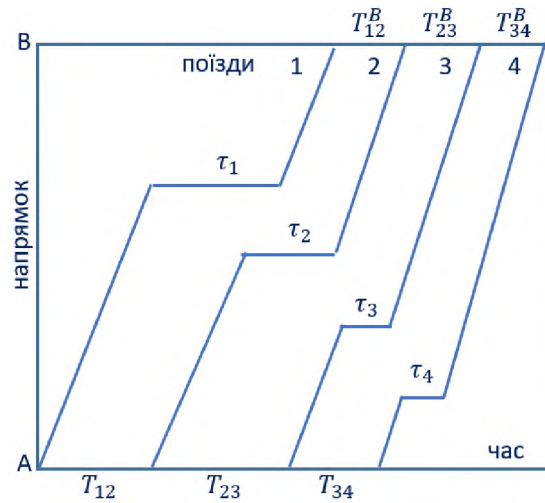


Рисунок 3.4 - Механізм виникнення вторинних затримок

Перш за все, розглянемо базову двопоїзну модель формування вторинних затримок. Міжпоїзний інтервал під час відправлення позначимо як $X_j + s_0$, де X_j — незалежні рівнорозподілені випадкові величини, $s_0 > 0$ — мінімальна безпечна відстань. Розподіл випадкових інтервалів прибуття u_j на станцію B залежить від функцій розподілу вихідного інтервалу та затримки τ_1 . Існують дві ситуації: з відсутністю впливу зупинки поїзда 1 на поїзд 2 (рисунок 3.5, а) та з виникненням вторинної зупинки (рисунок 3.5,б)

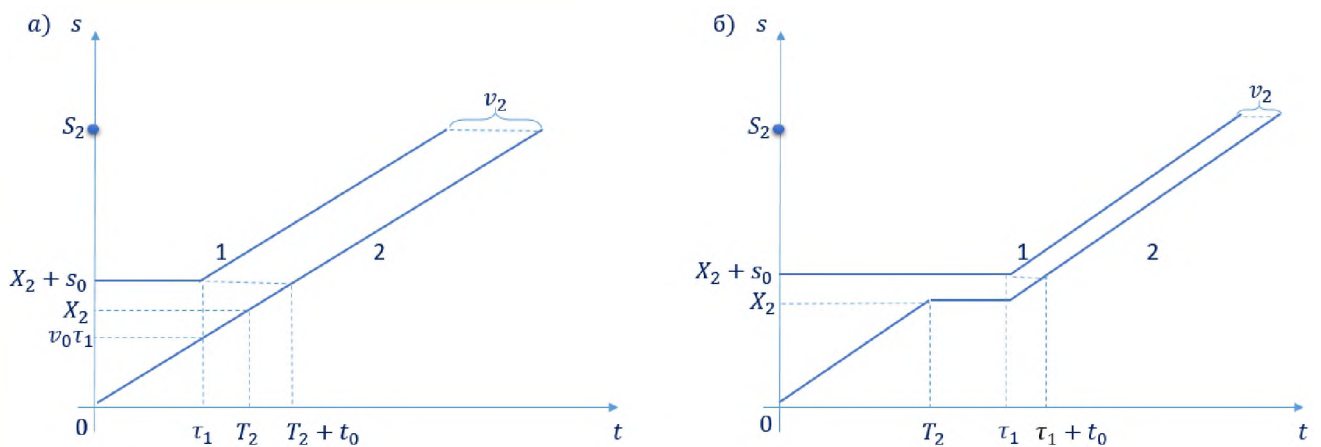


Рисунок 3.5 - Варіанти прямування введеного поїзда при різних інтервалах

Введемо такі позначення: $T_j = \frac{1}{v_0} X_j$ — час, необхідний поїзду j , щоб подолати відстань X_j , S_j — відстань від точки знаходження поїзда j до станції В у момент $t = 0$. З аналізу графіка видно, що $v_2 = T_2 - \tau_1 + t_0$

Нехай $f(x)$ і $g(x)$ — щільності розподілу випадкових величин X_2 і τ_1 відповідно. Покажемо, що для першого випадку виконується рівність

$$\frac{d}{dx} P(T_2 - \tau_1 + t_0 < t) = v_0 \int_0^\infty f(v_0(t - t_0 + y)) g(y) dy \quad (3.1)$$

Функцію щільності для моменту T_2 позначимо f_2 . Оскільки щільність розподілу суми незалежних випадкових величин є згортою вихідних щільностей, то

$$\frac{d}{dx} P(T_2 - \tau_1 < t) = \int_0^\infty f_2(t - y) g(-y) dy \quad (3.2)$$

Тут враховано, що $\tau_1 \geq 0$. Звідси

$$\frac{d}{dx} P(T_2 - \tau_1 + t_0 < t) = \int_0^\infty f_2(t - t_0 + y) g(y) dy$$

Очевидно,

$$f_2(t) = \frac{d}{dx} P(X_1 < tv_0) = v_0 f(tv_0)$$

Таким образом, рівняння (3.1) доведено, і, відповідно,

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dx} P(v_2 < t | T_2 \geq 0) = \\ & = \frac{d}{dt} P(T_2 - \tau_1 + t_0 < t) = v_0 \int_0^\infty f(v_0(t - t_0 + y)) g(y) dy \end{aligned} \quad (3.3)$$

При аналізі другого випадку слід врахувати, що $v_2 = t_0$ - величина не випадкова, тобто,

$$P(v_2 < t | T_2 - \tau_1 < 0) = F_0(t) \quad (3.4)$$

$$F_0(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } t \leq t_0, \\ 1, & \text{якщо } t > t_0. \end{cases}$$

Використовуючи формулу повної ймовірності, отримуємо вираз для розподілу випадкової величини вихідного інтервалу v_2

$$\begin{aligned} P(v_2 < t) &= P(T_2 - \tau_1 \geq 0)P(v_2 < t | T_2 - \tau_1 \geq 0) + P(T_2 - \tau_1 < 0) \cdot \\ P(v_2 < t | T_2 - \tau_1 < 0) &= P(T_2 - \tau_1 \geq 0)P(T_2 - \tau_1 + t_0 < t) + P(T_2 - \tau_1 < 0)F_0(t) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Зауважимо, що

$$\frac{d}{dt}F_0(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } t \neq t_0, \\ 0, & \text{якщо } t = t_0 - 0, \\ +\infty, & \text{якщо } t = t_0 + 0. \end{cases} \quad (3.6)$$

З (3.2) та (3.3) випливає, що

$$\frac{d}{dt}P(T_2 - \tau_1 < t) = v_0 \int_0^\infty f(v_0(t+y))g(y)dy \quad (3.7)$$

Звідки

$$P(T_2 - \tau_1 \geq 0) = v_0 \int_0^\infty \int_0^\infty f(v_0(t+y))g(y)dy dx \quad (3.8)$$

$$P(T_2 - \tau_1 < 0) = v_0 \int_{-\infty}^0 \int_0^\infty f(v_0(x+y))g(y)dy dx \quad (3.9)$$

З (3.5)-(3.9) виходить, що при $t > t_0$

$$\frac{d}{dt}P(v_2 < t) = v_0^2 \left(\int_0^\infty f(v_0(t - t_0 + y)) g(y) dy \right) \int_0^\infty \int_0^\infty f(v_0(x + y)) g(y) dy dx$$

(3.10)

$$\text{а при } t < t_0 \frac{d}{dt}P(v_2 < t) = 0$$

Праву частину рівності (3.10) позначимо через $p(t)$. З цієї рівності випливає, що для довільного $\Delta t < 0$

$$\frac{1}{\Delta t} P(t_0 < v_2 < t_0 + \Delta t) = p(\bar{t}_1), \quad (3.11)$$

де $\bar{t}_1 > t_0$ - деяка проміжна точка. Якщо функція f неперервна, то й p неперервна.

$$\text{Тому } \frac{d}{dt}P(v_2 < t) \Big|_{t=t_0+} = p(t_0)$$

Отже, рівність (3.10) справджується і при $t = t_{0+}$. За змістом описуваної моделі, $f(x)$ і $g(x)$ дорівнюють нулю при $x < 0$. Тому функція щільності випадкового вихідного інтервалу v_2 має вигляд

$$p(t) = v_0^2 \left(\int_0^\infty f(v_0(t - t_0 + y)) g(y) dy \right) \int_0^\infty \int_0^\infty f(v_0(x + y)) g(y) dy dx, t > t_0$$

Побудуємо базову трипоїзну модель формування вихідних інтервалів. Обчислимо щільність для величини v_3 -інтервалу між поїздами 2 і 3 у точці S_3 . Графік руху для варіанту моделі без вторинних затримок наведено на **рисунку 3.6**, для варіантів із розповсюдженням затримок — на **рисунку 3.7**.

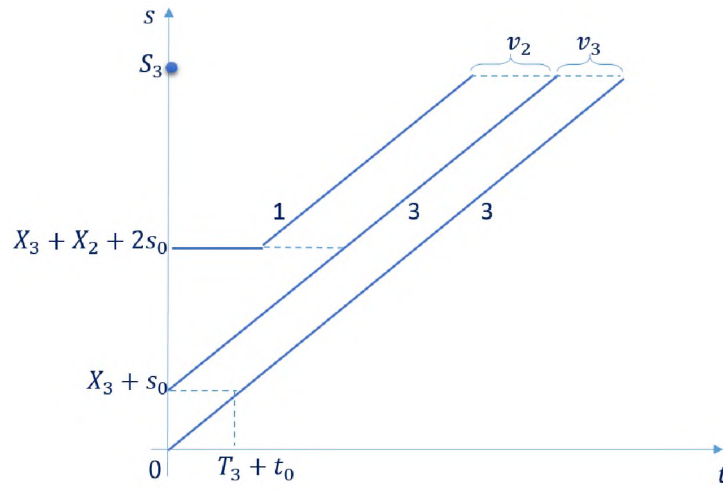


Рисунок 3.6 — Рух за відсутності ефекту розповсюдження затримок

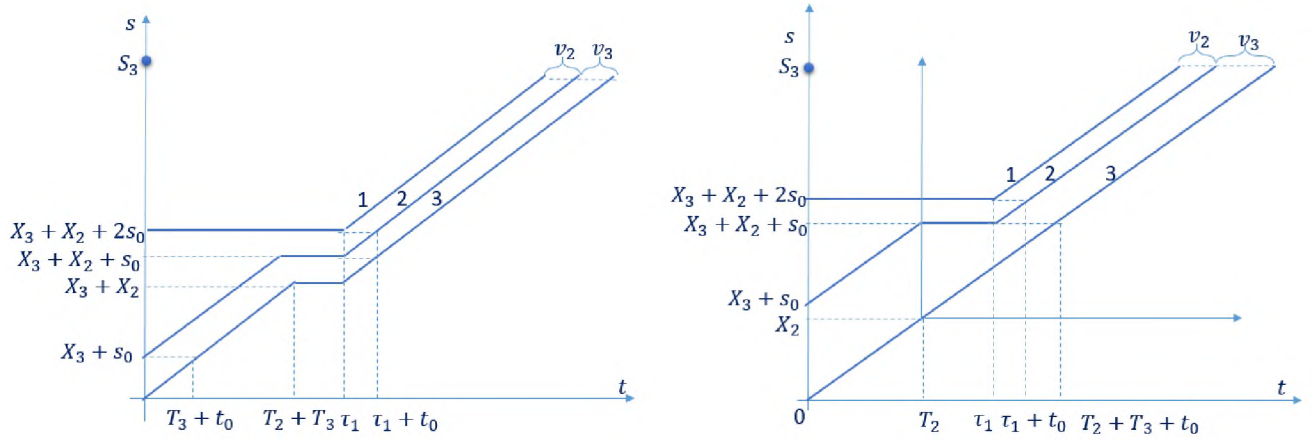


Рисунок 3.7 — Рух групи поїздів за умови наявності ефекту розповсюдження

Функція щільності для першого випадку має такий вигляд

$$\frac{d}{dx} P(v_3 < t | T_2 - \tau_1) = \frac{d}{dx} P(T_3 + t_0 < 0) = v_0 f(v_0(t - t_0)). \quad (3.11)$$

Для випадку $T_2 < \tau_1$, $T_2 + T_3 \geq \tau_1$ (рисунок 3.7, б), коли $v_3 = T_2 + T_3 + t_0 - \tau_1$, отримуємо аналогічно (3.11)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} P(v_3 < t | T_2 < \tau_1, T_2 + T_3 \geq \tau_1) &= \frac{d}{dx} P(T_2 + T_3 + t_0 - \tau_1 < t) = \\ &= v_0 \int_0^\infty f^{*2}(v_0(t - t_0 + y)) g(y) dy. \end{aligned} \quad (3.12)$$

де $f^{*2}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x-y)f(y)dy$ - двократна згортка щільності f .

Застосувавши формулу повної ймовірності, маємо

$$P(v_3 < t) = P(T_2 - \tau_1 \geq 0)P(T_3 + t_0 < t) + P(T_2 - \tau_1 < 0, T_2 + T_3 < \tau_1)F_0(t) + P(T_2 - \tau_1 < 0, T_2 + T_3 \geq \tau_1)P(T_2 + T_3 + t_0 - \tau_1 < t). \quad (3.13)$$

Позначимо $f_{2,3}$ - щільність розподілу $(T_2 + T_3)$, маємо

$$\begin{aligned} P(T_3 + t_0 < t) &= P(X_3 < v_0(t - t_0)), \\ P(T_2 - \tau_1 < 0, T_2 + T_3 < \tau_1) &= \int_0^{\infty} f_{2,3}(t + y)g(y)dy \\ &= v_0 \int_0^{\infty} f^{*2}(v_0(t + y))g(y)dy \end{aligned}$$

Припускаючи, що $(T_2 - \tau_1)$ і T_3 незалежні, отримуємо спільну щільність $f(t, z)$ цих випадкових величин $v_0^2 f(v_0(t + y))g(y)dy$

Таким чином,

$$P(T_2 - \tau_1 < 0, T_3 \geq -(T_2 - \tau_1)) = v_0^2 \int_0^{\infty} \left(\int_0^{\infty} f(v_0(y - t))g(y)dy \right) \int_t^{\infty} f(v_0 z)dz$$

Враховуючи (3.8) і (3.9), отримаємо при $t > t_0$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}P(v_3 < t) &= v_0^2 f(v_0(t - t_0)) \int_0^{\infty} \left(\int_0^{\infty} f(v_0(x + y))g(y)dy \right) + \\ &v_0^3 \int_0^{\infty} \left[\left(\int_0^{\infty} f(v_0(y - t))g(y)dy \right) \left(\int_t^{\infty} f(v_0 z)dz \right) \right] dt \int_0^{\infty} f^{*2}(v_0(t - t_0 + y))g(y)dy. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Отримані залежності будуть використані далі при аналізі характеристик розсіювання інтервалів прибуття поїздів на станції.

3.3 Розподіл інтервалів прибуття при пакетному русі

Припустимо, на ділянку відправляється пакет поїздів, поїзд 1 — у момент $t = 0$. Тоді час $T^{(m)}$ відправлення поїзда m записується у вигляді

$$T^{(m)} = \sum_{j=2}^m T_j + (m-1)t_0, m = 2, 3, \dots, n \quad (3.15)$$

Розглянемо задачу знаходження розподілу випадкового інтервалу прибуття v_k на станцію B при припущенні, що позаграфікову зупинку випадкової тривалості τ робить тільки поїзд 1. Потрібно знайти функції розподілу $W_k(t) = P(v_k < t), k = 2, 3, \dots, n$ вихідних інтервалів.

Сформульована загальна задача еквівалентна наступній. Нехай поїзд 1 затриманий на станції A в момент $t = 0$ на випадковий час τ . Якщо $\tau < T_2$, то поїзди 2, 3 тощо відправляються в заплановані моменти часу. Якщо $\tau > T_2$, то поїзд 2 буде затриманий і почне рух у момент $\tau + t_0 > T^{(2)}$. Поїзд 3 відправляється за таким самим правилом. Тепер v_k — це інтервали між моментами відправлення поїздів з номерами $(k-1)$ і k . Потрібно визначити функції розподілу $W_k(t)$ величин $v_k, k = 2, 3, \dots, n$.

Як приклад розглянемо механізм формування інтервалів руху п'яти поїздів при різних значеннях затримки τ . Мінімальний інтервал і буферна добавка дорівнюють, відповідно, $t_0 = 1, T_k = 2$. Припустимо, що моменти планового відправлення задовольняють рівності $T^{(k)} = 3(k-1)$. На рисунку 3.8 показано фрагмент розкладу, з якого випливає, що кількість скорочених інтервалів прибуття зростає при збільшенні затримки τ .

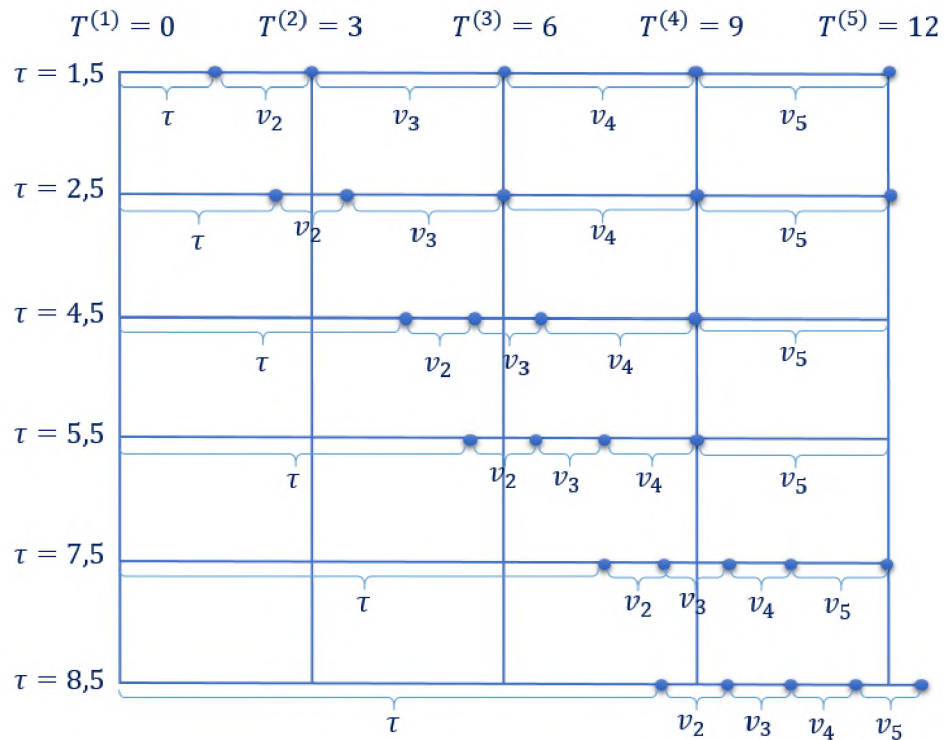


Рисунок 3.8 – Формування інтервалів прибуття за зєяких затримках τ

У подальшому розгляді будемо позначати символом $R^{(k)}$ — на відміну від $T^{(k)}$ - реальний момент відправлення поїзда під номером k . Порядок відправлення поїздів формалізується наступним чином. Нехай $k, 2 \leq k \leq n$, фіксовано.

$$\text{Якщо} \quad R^{(k-1)} \leq T^{(k)} - t_0, \quad (3.16)$$

$$\text{то} \quad R^{(k-1)} = T^{(k)} \quad (3.17)$$

$$\text{Якщо} \quad R^{(k-1)} \geq T^{(k)} - t_0, \quad (3.18)$$

$$\text{то} \quad R^{(k)} = R^{(k-1)} + t_0 \quad (3.19)$$

Далі будемо використовувати таке позначення

$$I(x \in A) = \begin{cases} 1, \text{якщо } x \in A \\ 0, \text{якщо } x \in R \setminus A \end{cases}, m = 2, 3, \dots, n$$

де A — довільна множина на числовій прямій R .

Припустимо, що загальна кількість поїздів на ділянці $n \geq 2$, і $v_k = 0$, якщо $k > n$.

Теорема 1.

1. Якщо $\tau < T_2$, то $v_2 = T_2 + t_0 - \tau$, $v_k = T_k + t_0$, $k = 3, \dots, n$

2. Нехай k — фіксоване ціле, $2 \leq k \leq n$.

$$\text{Якщо} \quad \tau \geq \sum_{j=2}^k T_j, \quad (3.20)$$

$$\text{то} \quad v_2 = \dots = v_k = t_0 \quad (3.21)$$

$$\text{Якщо} \quad \sum_{j=2}^k T_j \leq \tau \leq \sum_{j=2}^{k+1} T_j, \quad (3.22)$$

$$\text{то } v_{k+1} = I(k+1 \leq n) [\sum_{j=2}^{k+1} T_j + t_0 - \tau] \quad (3.23)$$

$$v_m = I(m \leq n)(T_m + t_0), \quad m = k+2, \dots, n \quad (3.24)$$

Теорема 2.

Нехай $n \geq 2$. В такому випадку справедливі наступні функції розподілу для інтервалів прибуття першої і наступних пар поїздів

$$W_2(t) = I(t > t_0)P(\tau + t - t_0 > T_2), \quad (3.25)$$

$$W_2(t) = I(t > t_0) [P(T_k < t - t_0, \tau < \sum_{j=2}^{k-1} T_j) + P(\tau + t - t_0 > \sum_{j=2}^k T_j, \tau \geq \sum_{j=2}^{k-1} T_j)], \quad 3 \leq k \leq n \quad (3.26)$$

Оскільки $\sum_{j=2}^l T_j = 0$, то при $k \geq 2$ у правій частині формули (3.26) маємо

$$P(T_k < t - t_0, \tau < \sum_{j=2}^l T_j) = 0,$$

$$P\left(\tau + t - t_0 > \sum_{j=2}^2 T_j, \tau \geq \sum_{j=2}^l T_j\right) = P(\tau + t - t_0 > T_2)$$

Тому при $k = 2$ формула (3.26) збігається з формулою (3.25).

Наслідок 1. Формула (3.26) справджується при $2 \leq k \leq n$.

Наслідок 2. Нехай всі T_j , $j = 2, \dots, n$, постійні і не обов'язково рівні між собою, $g(x)$ - щільність розподілу τ . Тоді справедлива формула

$$W_k(t) = I(t_0 < t \leq T + t_0) \int_{\sum_{j=2}^k T_j - t + t_0}^{\infty} g(x) dx + I(t \leq T_k + t_0), \quad 2 \leq k \leq n, \quad (3.28)$$

причому $W_2(t) = I(t > t_0) \int_{T_2 - t + t_0}^{\infty} g(x) dx$.

Наслідок 3. Нехай всі T_j , $j = 2, \dots, n$, постійні й дорівнюють одному й тому ж числу T , Тоді справедлива формула

$$W_k(t) = I(t_0 < t \leq T + t_0) \int_{(k-1)T_j - t + t_0}^{\infty} g(x) dx + I(t > T + t_0), \quad 2 \leq k \leq n, \quad (3.29)$$

$$\text{причому, } W_2(t) = I(t > t_0) \int_{T - t + t_0}^{\infty} g(x) dx \quad (3.30)$$

I

Наслідок 4. T_k , $k = 2, \dots, n$ – незалежні величини з одноковою щільністю $\psi(x)$. Нехай τ має щільність $g(x)$ і не залежить T_k ($k = 2, \dots, n$). Тоді розподіл для інтервалу прибуття першої пар поїздів має вигляд

$$W_2(t) = I(t > t_0) \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{z - t + t_0}^{\infty} g(x) dx \right) \psi(z) dz, \quad (3.31)$$

для наступних інтервалів

$$W_k(t) = I(t > t_0) \left\{ \int_{-\infty}^{t + t_0} \psi(z) dz + \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{t - t_0}^{\infty} \left(\int_{z + u - t + t_0}^{\infty} g(x) dx \right) \psi(z) dz \right] \psi^{8(k-2)}(u) du \right\}, \quad (3.32)$$

де $f^{*2} := f * f$, $f^{*m} := f * f^{*(m-1)}$, $m \geq 2$ — згортка ідентичних щільностей.

Оскільки розглянуті випадкові величини є додатними, то в цих функціях межу інтегрування $(-\infty)$ можна замінити на 0.

Визначимо 0-кратну згортку як узагальнену функцію з такою властивістю: для будь-якої обмеженої неперервної функції $v(t)$ виконується рівність $\int_{-\infty}^{\infty} v(t) \psi^{*0}(t) dt = v(0)$. Тоді формула (3.32) при $k = 2$ збігається з (3.31).

Лема 1. Для кожного цілого фіксованого m , $1 \leq m \leq n - 1$,

$$P(N \geq m) = P(\tau > \sum_{j=2}^{m+1} T_j) \quad (3.33)$$

Наведемо два наслідки, що випливають з цієї леми.

Наслідок 5. Якщо $T_j = T$ - постійна величина, то

$$P(N \geq m) = \int_{mT}^{\infty} g(x) dx.$$

Наслідок 6. Якщо $T_2, \dots, T_n$ — незалежні однаково розподілені випадкові величини з щільністю ψ , то

$$P(N \geq m) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_u^{\infty} g(x) dx \right) \psi^{*m}(u) du.$$

3.4 Розподіл інтервалів прибуття з урахуванням реальної статистики

Визначимо вид і параметри розподілу інтервалів прибуття поїздів на станцію B при показовому розподілі тривалості неграфікових зупинок — найбільш поширеній моделі.

Лема 2. Нехай усі T_j є постійними та дорівнюють деякому $T > 0$. Якщо розподіл ймовірностей первинної затримки є експоненціальним,

$$g(x) = I(x > 0) \lambda e^{-\lambda x}, \text{ де } \lambda > 0 \quad (3.34)$$

то, враховуючи співвідношення (3.29) при $k \geq 2$, маємо функцію розподілу інтервалів прибуття

$$W_k(t) = I(0 < t - t_0 \leq T) e^{-\lambda(k-1)T - t + t_0} + I(t - t_0 > T), \quad (3.35)$$

Крім того, середнє та дисперсія цих інтервалів мають вигляд

$$Ev_k = t_0 + T - \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda(k-2)T} + (1 - e^{-\lambda T}), \quad (3.36)$$

$$Dv_k = \frac{1}{\lambda^2} e^{-\lambda(k-2)T} + [2 - (1 - e^{-\lambda T}) - e^{-\lambda(k-2)T}]^2 - 2\lambda T e^{-\lambda T}, \quad (3.37)$$

На рисунку 3.9 зображено графіки функцій розподілу вихідних інтервалів $W_k(t)$ для трійки поїздів при експоненційній первинній затримці.

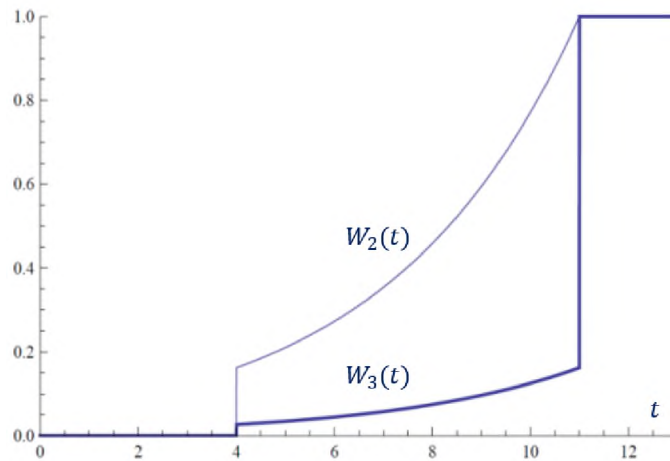


Рисунок 3.9 - Функції розподілу інтервалів прибуття поїздів

Легко побачити, що чим більший номер затримки k , тим функція розподілу інтервалів прибуття $W_k(t)$ ближча до $W(t) := I(t > t_0 + T)$. Це узгоджується з формулами (3.36) і (3.37), згідно з якими $Ev_k \rightarrow t_0 + T$, $Dv_k \rightarrow 0$ при $k \rightarrow \infty$.

Якщо задана ймовірність p того, що відбудеться не менше m вторинних затримок, а τ розподілена з щільністю (3.34), то, згідно з Наслідком 5, виконується така умова для параметра T

$$T \geq \frac{1}{m\lambda} \ln \frac{1}{p}, \quad (3.38)$$

Позначимо через $T(m, p, \lambda)$ мінімальний інтервал T , що задовольняє нерівність (3.38). На рисунку 3.10 показано зміну мінімального інтервалу залежно від кількості допустимих вторинних затримок m при різних ймовірностях: $p = 0,1$ і $p = 0,05$. Зрозуміло, що зі зменшенням p величина $T(m, p, \lambda)$ зростає. Це підтверджує очевидне міркування: якщо ми хочемо зменшити вплив вторинних затримок, необхідно збільшити інтервал відправлення.

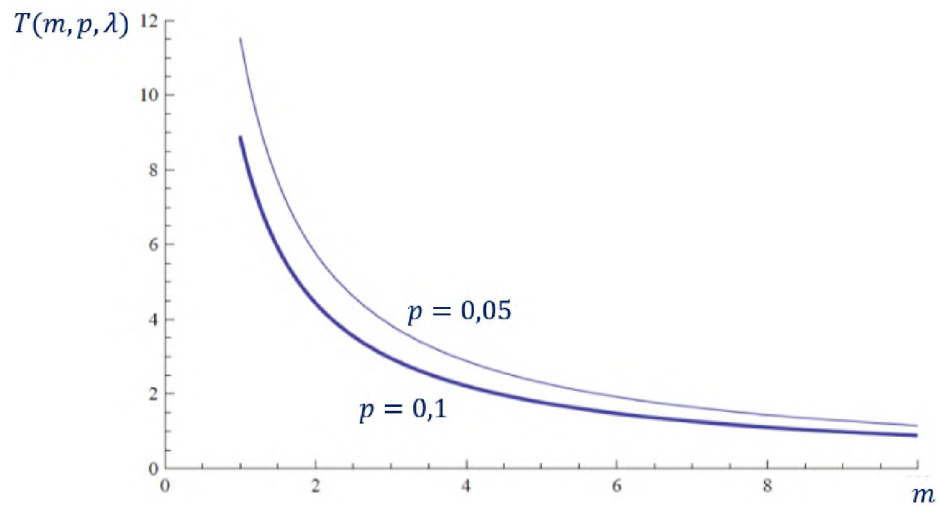


Рисунок 3.10 - Мінімальний інтервал при різній кількості допустимих вторинних затримок і різній ймовірності їх виникнення

Точні обчислення інтервалу виконуються за формулою

$$T(m, p, \lambda) = \frac{1}{m\lambda} \ln \frac{1}{p} \quad (3.39)$$

Тепер фіксуємо $p = 0,1$. На рисунку 3.11 зображено поведінку $T(m, p, \lambda)$ при $\lambda = 0,26$ і $\lambda = 0,15$. Оскільки справедливо: $E\tau = \frac{1}{\lambda}$, - то зниження λ призводить до збільшення середнього значення первинної затримки.

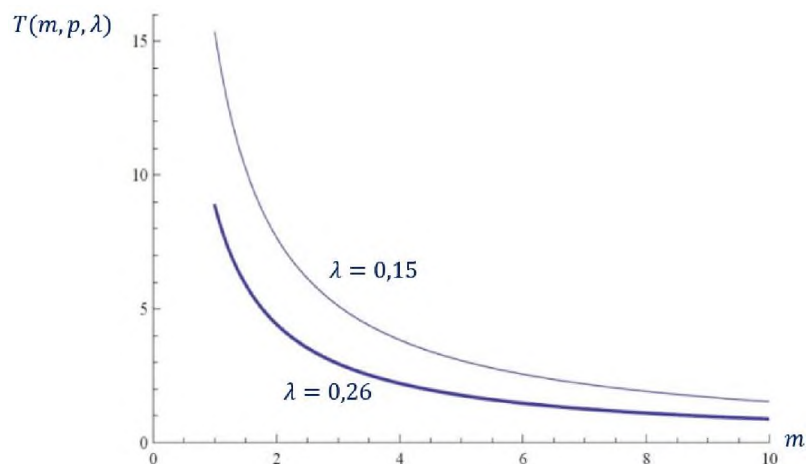


Рисунок 3.11 - Мінімальний інтервал при різній кількості затримок і різних значеннях параметра вихідного розподілу

Як приклад розрахуємо величину мінімального графічного інтервалу T_{opt} відправлення поїздів зі станції A , при дотриманні якого ймовірність $P(M^{втор} \geq k)$ реалізації вторинних зупинок числом $M^{втор}$ не перевищує $\alpha = 10\%$. При цьому припустимо, що параметр первинної затримки $\lambda = 0,261/\text{хв}$ і сереньоквадратичне відхилення (■)В) розсіювання моментів відправлення поїздів становить 0,5 хв. (що справедливо в умовах дотримання дисципліни відправлення поїздів).

Припустимо, що тривалість неграфікової зупинки τ_1 описується розподілом $g(\tau_1)$. Кількість вторинних затримок $M_{сер}^{втор}$ по групі поїздів залежить від тривалості, виду розподілу первинних зупинок і середнього інтервалу відправлення T_{opt} . Припустимо, що інтервал T_{opt} є сумою випадкової величини T і фіксованого безпечного інтервалу t_0 : $T_{opt} = T + t_0$. Розглядаючи траєкторії руху поїздів як геометричні елементи, отримуємо

$$M^{втор} = k \Leftrightarrow kT < \tau_1 < (k+1)T, 1 \leq k \leq n-2,$$

де n — кількість поїздів. Звідси випливає, що критерієм виникнення не менше ніж k затримок під час зближення поїздів на відстань S_0 слугує нерівність: $\tau_1 > \tau_1 T$.

У цьому випадку

$$P(M^{втор} \geq k) = P(\tau_1 > \tau_1 T) \int_{kT}^{\infty} g(\tau_{пер}) dt, \quad (3.40)$$

Символом x_q позначимо квантиль розподілу випадкової величини τ_1 порядку q . Тоді $x_{1-\alpha}$ є розв'язком рівняння $\alpha = \int_x^{\infty} g(\tau_{пер}) dt$ відносно величини x .

Прирівнюючи kT і $x_{1-\alpha}$, отримуємо розв'язок задачі у такому вигляді

$$T = \frac{x_{1-\alpha}}{k}. \quad (3.41)$$

Інтервал $T_{opt}^{ван}$, при якому ймовірність виникнення не менше k вторинних зупинок не перевищує рівня α , оцінюється значенням $(T + t_0)$. Наприклад, при показовому розподілі первинної затримки величина в чисельнику (3.41) дорівнює: $x_{1-\alpha} = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1}{\alpha}$. За умови, що $\alpha = 0.1$, отримуємо $x_{0.9} 1.86$. З урахуванням того, що в потоці вантажних поїздів безпечний інтервал дорівнює 4 хв. і допустима кількість вторинних затримок $k = 3$, робимо висновок, що інтервал відправлення поїздів з вихідної станції повинен становити не менше 7 хв.

Оцінки міжпоїзного інтервалу для іншої кількості допустимих вторинних затримок отримуються, якщо використовувати графіки рисунків 3.10 і 3.11. Так, наприклад, для двох затримок додатковий (до значення T) інтервал дорівнює 4,5 хв. Загальна тривалість інтервалу відправлення при цьому становить 8,5 хв. Якщо ж висунути більш жорстку вимогу, призначивши кількість вторинних зупинок $M^{втор}$ рівною 1, то міжпоїзний інтервал, розрахований за даною методикою, необхідно збільшити до 13 хв.

Слід зазначити, що інтервал пакетного руху великогабаритних вантажних поїздів на залізницях становить від 10 до 14 хвилин. Рішення встановити такий період вантажного графіка руху прийнято емпірично, на основі попереднього досвіду — з метою забезпечення мінімальної кількості позапланових затримок поїздів на шляху прямування.

Отримане значення міжпоїзного інтервалу $T_{opt}^{ван}$ можна розглядати як межу, яка розділяє періоди економічного та інтенсивного пропуску вантажних поїздів на дільнці. Ці періоди призначаються диспетчером на основі аналізу прогнозованої інформації про кількість поїздів, які планується відправити на дільницю в кожну наступну годину.

Розрахункові показники розсіювання інтервалів прибуття поїздів на кінцеву станцію завантаженої дільниці визначаються на основі співвідношень, отриманих вище. Так, наприклад, значення середніх, дисперсій та σ_{max} для другого та третього інтервалів прибуття, розраховані за допомогою (3.36) та (3.37), становлять:

$$Ev_2 = 7,77702, \quad Dv_2 = 5,68009, \quad \sqrt{Dv_2} = 2,38329,$$

$$Ev_3 = 10,4778, \quad Dv_3 = 2,33068, \quad \sqrt{Dv_3} = 1,52666.$$

Отримані значення підтверджують, що зона розсіювання при прибутті звужується для ниток поїздів, які все більше віддаляються від первинного конфлікту. Розрахункова величина інтервалу прибуття при періодичності вантажного графіка, що дорівнює 7 хв. (ситуація насичення), перевищує 10,5 хв

3.5 Уточнена модель формування інтервалів прибуття поїздів

Аналіз реальних статистичних даних показує, що при відновленні руху після позапланових зупинок розподіл міжпоїзних інтервалів задовільно описується законом Гаусса. Досліджуємо нову версію моделі формування відхилень, в якій приймається експоненціальний розподіл первинної зупинки та нормальний — міжпоїзного інтервалу

$$g(x) = I(x > 0)\lambda e^{-\lambda x}, \quad \psi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{(x-T)^2}{2\sigma^2}} \equiv \varphi(x, T, \sigma^2) \quad (3.42)$$

де λ , T і σ^2 — деякі додатні параметри.

Функція нормально розподіленої випадкової величини Y має вигляд

$$P(Y < x) = \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{\frac{-t^2}{2}} dt$$

Зауважимо, що оскільки випадкові інтервали T_j не можуть бути від'ємними, то, строго кажучи, припущення про вигляд щільності ψ в (3.42) є некоректним. Однак, за рахунок вибору параметра σ (при відомому T) можна домогтися того, щоб ймовірність події $\{T_j < 0\}$ виявилася близькою до нуля.

Припустимо, що

$$4\sigma + \lambda\sigma^2 < T. \quad (3.43)$$

З (3.43) випливає, зокрема, що $T/\sigma > 4$. Тоді

$$P(T_j < 0) = P(\sigma Y + T < 0) < P(Y < -4) < 0.000032$$

Зауважимо, що вибір щільності ψ , визначеної в (3.42), обумовлений, зокрема, властивістю: для будь-якого цілого $m \geq 1$ справджується рівність

$$\psi^{*m}(x) = \varphi(x, mT, m\sigma^2). \quad (3.44)$$

Також, при $3 \leq k \leq n$, позначимо

$$a = (k - 2)T, \quad b^2 = (k - 2)\sigma^2, \quad \bar{\xi} = a - \lambda b^2.$$

Лема 3. Припустимо, що T_j — незалежні однаково розподілені випадкові величини. Якщо щільності g і ψ визначені (3.42), то функції розподілу першого та наступних інтервалів записуються у вигляді

$$W_2(t) = I(t - t_0 - T) \left[\Phi\left(\frac{t - t_0 - T}{\sigma}\right) + e^{-\lambda\left(T - \frac{\lambda\sigma^2}{2} - t + t_0\right)} \left(1 - \Phi\left(\frac{t - t_0 - T + \lambda\sigma^2}{\sigma}\right)\right) \right] \quad (3.45)$$

$$\begin{aligned} W_k(t) = I(t > t_0) \left\{ \Phi\left(\frac{t - t_0 - T}{\sigma}\right) + \exp\left\{-\lambda\left[(k - 1)\left(T - \frac{\lambda\sigma^2}{2}\right) - t + t_0\right]\right\} \left[\left(1 - \Phi\left(\frac{t - t_0 - T + \lambda\sigma^2}{\sigma}\right)\right) \Phi\left(\frac{\bar{\xi}}{b}\right) + \int_{-\infty}^0 \left(1 - \Phi\left(\frac{t - t_0 - T + \lambda\sigma^2 - u}{\sigma}\right)\right) \varphi(u, \bar{\xi}, b^2) du \right] + \int_{-\infty}^0 \left(\Phi\left(\frac{t - t_0 - T - u}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{t - t_0 - T}{\sigma}\right)\right) \varphi(u, a, b^2) du \right\}. \end{aligned} \quad (3.46)$$

На рисунку 3.12 зображено графіки функцій $W_k(t)$ при $k = 2, 3$ з типовими параметрами, характерними для вантажного руху, та $\sigma = 0,5$ хв.

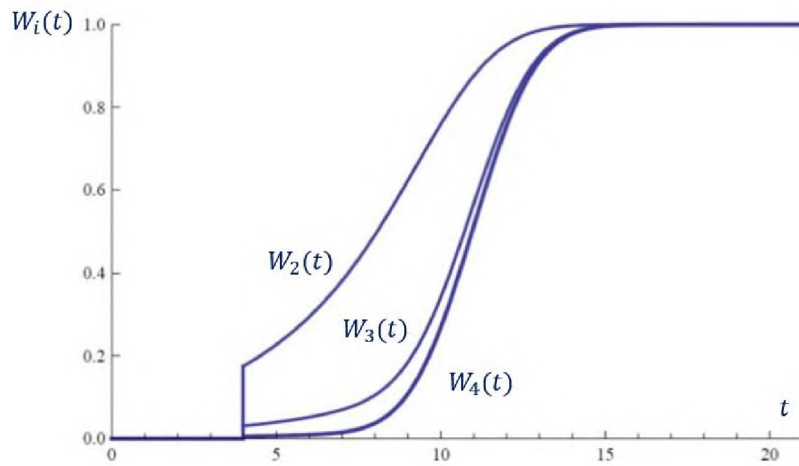


Рисунок 3.12 - Графіки функцій $W_k(t)$ при величині $\sigma = 0,5$

Розгляд кривих розподілу вихідних інтервалів показує, що зі збільшенням номера затриманого поїзда форма розподілу наближається до одиничного стрибка. Це свідчить про тенденцію до скорочення вторинного запізнення і, надалі, до його повного зникнення.

Розглянемо, як поведуться функції $W_k(t)$ при зміні дисперсії. Для прикладу візьмемо $k = 2$; параметри λ і T визначені (3.38). На рисунку 3.13 показано графіки $W_2(t)$ для випадків, коли $\sigma = 0,5$ і $\sigma = 5$. Як і можна було очікувати, при зменшенні σ графік $W_2(t)$ для $t > t_0$ стає більш крутим

Зі збільшенням λ функції $W_2(t)$ та $W_k(t)$ дедалі більше наближаються до одиничного стрибка, що підтверджує швидке загасання процесу розмноження.

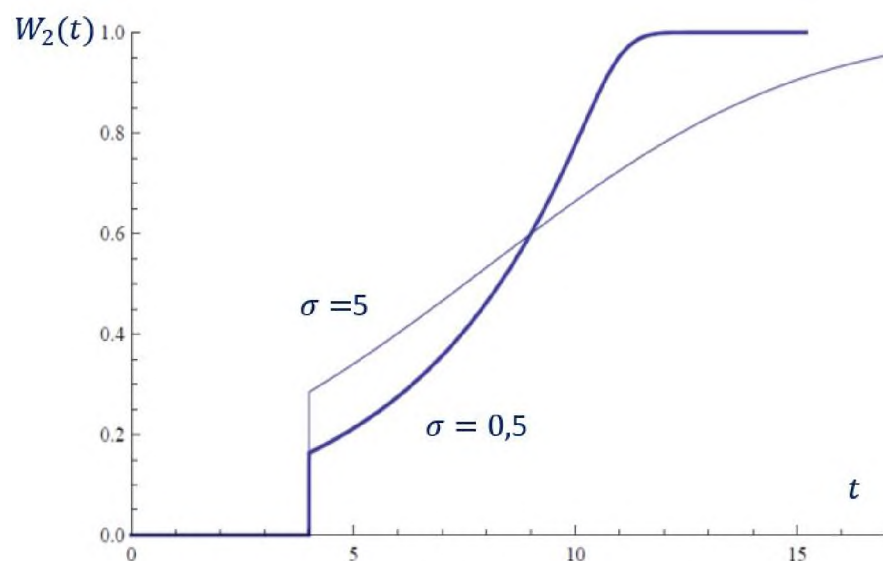


Рисунок 3.13 — Графіки функції $W_2(t)$ при $\sigma = 0,5$ і $\sigma = 5$

Нехай щільності g і ψ визначені рівностями (3.42). Припустимо, p - максимальна допустима ймовірність того, що відбудеться не менше m вторинних затримок. Якими мають бути параметри T і σ^2 , щоб виконувалася нерівність $P(N \geq m) \leq p$? З наслідку 6 теореми 2 випливає

$$P(N \geq m) = \int_{-\infty}^0 \varphi(u, a, b^2) du + \int_0^{\infty} e^{-\lambda u} \varphi(u, a, b^2) du, \quad (3.47)$$

де $a = mT$, $b^2 = m\sigma^2$. Можна показати, що

$$\int_0^{\infty} e^{-\lambda u} \varphi(u, a, b^2) du = e^{-m\lambda(T - \frac{\lambda\sigma^2}{2})} \Phi\left(\sqrt{m} \frac{T - \lambda\sigma^2}{\sigma}\right)$$

Вибираючи параметри T і σ^2 так, щоб перший інтеграл у (3.47) був достатньо малим, маємо умову щодо цих параметрів у вигляді нерівності:

$$e^{-m\lambda(T - \frac{\lambda\sigma^2}{2})} \Phi\left(\sqrt{m} \frac{T - \lambda\sigma^2}{\sigma}\right) \leq p \quad (3.48)$$

Отримане співвідношення дозволяє розрахувати уточнену величину інтервалу відправлення поїздів з вихідної станції за заданої безпечної відстані між поїздами та відомої статистики первинних затримок.

3.6 Модель процесу оперативної корекції випадкових відхилень

Базова стохастична модель руху показує, що дисперсія моментів прибуття зростає у міру руху поїзда по маршруту. Статистика цього не підтверджує: ефект розширення поля розсіювання виражений слабо. Нами показано, що це обумовлено наявністю регулювання швидкісного режиму, яке ситуативно

реалізується машиністом і (побічно) диспетчером. Дослідження підтверджують, що вплив зусиль машиніста (або системи автокерування) відбивається, переважно, на формуванні перегінних часів. Диспетчерський персонал вносить свій внесок у процес управління, головним чином, коригуючи зупинки поїздів на станціях при виникненні нештатних ситуацій.

Факт розширення поля розсіювання моментів у кожному перерізі графіка в міру наближення поїзда до станції вже відзначався в деяких роботах (наприклад, у статті [71]). Однак моделі, що описує цей процес, не запропоновано.

Формуючи модель, розглянемо механізм коригувальної дії, що реалізується з метою запобігання ранньому прибуттю поїзда (рисунок 3.14).

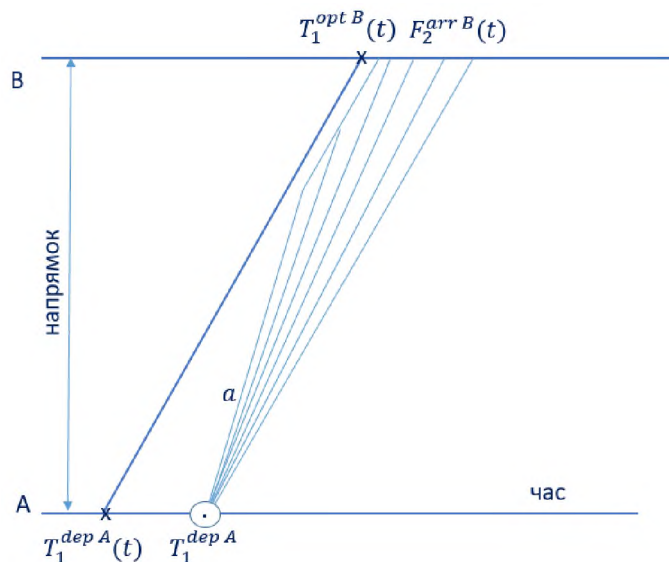


Рисунок 3.14 – Схема формування розсіювання моментів прибуття поїзда

Припустимо, поїзд затримався на відправленні з початкової станції. Щоб ліквідувати запізнення, на першій частині дільниці машиніст використовує прискорений режим. У реальних умовах, коли поїзд піддається випадковим впливам, реакція машиніста є досить невизначеною. Як результат, фактична траєкторія поїзда розташовується в межах певної зони розсіювання (що відображається «віялом» ліній ходу). У разі, якщо машиніст виявляє, що графік відновлено в результаті використання «нагону», він змінює режим — уповільнює рух. При цьому ширина розподілу моментів прибуття стабілізується.

Визначимо, яким буде розподіл моментів прибуття $F^B(t)$ у пункт $P(v_1)$ (рисунок 3.15) за наявності регулятора (машиніста). Припустимо, задані обмеження часу ходу по перегону максимальним (t_{max}^{AB}) і мінімальним (t_{min}^{AB}) значеннями, що відображено лініями, позначеними відповідно v_1 і v_2 . Ці лінії обмежують сектор, в який потрапляють траєкторії можливого руху поїзда під впливом випадкових факторів. Фігурною дужкою на графіку позначено проекцію максимально можливого носія щільності $f(t; s_2)$.

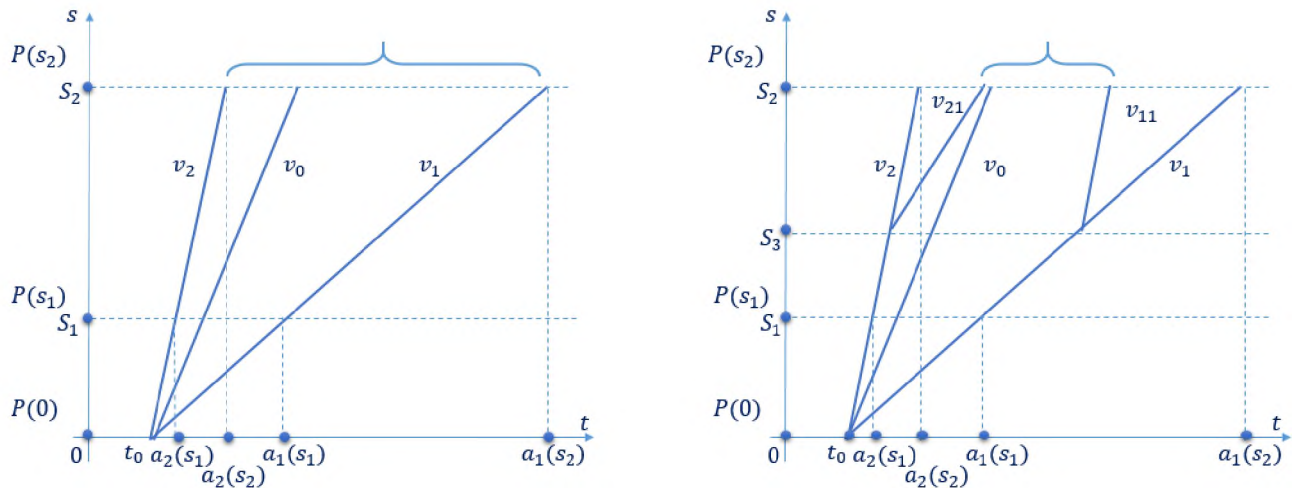


Рисунок 3.15 - Модель руху поїзда з урахуванням розсіювання швидкості: а) за відсутності оперативного підлаштування; б) за наявності підлаштування

Момент прибуття поїзда в довільну точку колії s дорівнює

$$a_j(s) = t_0 + \frac{s}{v_j}. \quad (3.49)$$

Випадкова величина $Y(s) = \tau(s) - a_0(s)$ — це відхилення моменту $\tau(s)$ прибуття поїзда в зазначену точку від графічного $a_0(s)$. Через $f(t; s)$ позначимо щільність розподілу моментів прибуття в точку s , а через $g(t; s)$ — щільність розподілу відхилень $Y(s)$. Очевидно,

$$g(t; s) = f(t + a_0(s); s) \quad (3.50)$$

Зауважимо, що носії функцій $f(t; s_1)$ та $f(t; s_2)$ не виходять за межі проміжків $[a_2(s_1), a_1(s_1)]$ і $[a_2(s_2), a_1(s_2)]$ відповідно.

Враховуючи обмеження щодо швидкості, що призводять до лінійних меж для функції $s(t)$, знаходимо, що кожному $t \in [a_2(s_1), a_1(s_1)]$ відповідає $t' \in [a_2(s_2), a_1(s_2)]$ за формулою

$$t' = A(s_2)t + B(s_2), \quad (3.51)$$

$$\text{де } A(s) = \frac{a_1(s) - a_2(s)}{a_1(s_1) - a_2(s_1)}, D(s) = \frac{a_2(s)a_1(s_1) - a_2(s_1)a_1(s)}{a_1(s_1) - a_2(s_1)}, s_1 \leq s \leq s_2.$$

Зауважимо також, що при збільшенні s довжина проміжку $[a_2(s), a_1(s)]$ зростає, якщо умова на граничні швидкості не змінюється, тобто якщо відсутнє регулювання. У цьому випадку ширина розглянутого розподілу збільшується (рисунок 3.15, а). Коригування швидкості, що здійснюється машиністом, запобігає «розповзанню» розподілу (рисунок 3.15, б), що, у свою чергу, призводить до меншого ризику відхилення від графіка. Замість фрази «випадкові величини W_1 і W_2 однаково розподілені» будемо писати $W_1^d = W_2$.

Припустимо, що на протязі шляху від s_1 до s не було коригування з урахуванням умови на граничні швидкості; тоді

$$\tau(s)^d = A(s)\tau(s_1) + B(s), s_1 \leq s \leq s_2 \quad (3.52)$$

де $A(s)$ і $B(s)$ — функції, визначені в (3.51), причому $A(s) \neq 0$. А це, у свою чергу, означає, що $Y(s)^d = A(s)(Y(s_1) + a_0(s_1)) + B(s)$.

Зауважимо, що якщо $f(t)$ — щільність розподілу випадкової величини X , $A \neq 0$ і B - постійні. З цього зауваження, зробленого припущення і рівняння (3.50) висуваємо, що при $s_1 \leq s \leq s_2$

$$f(t; s) = \frac{1}{|A(s)|} f\left(\frac{t - B(s)}{A(s)}; s_1\right) \quad (3.53)$$

$$g(t; s) = f(t + a_0(s); s) \frac{1}{|A(s)|} f\left(\frac{t+a_0(s)-B(s)}{A(s)}; s_1\right) = \frac{1}{|A(s)|} g\left(\frac{t+a_0(s)-B(s)}{A(s)} - a_0(s); s_1\right). (3.54)$$

Звідси випливає, що зі зменшенням $A(s)$ носій щільності звужується. Так, якщо при можливому запізненні в контрольний пункт збільшити мінімальну допустиму швидкість або при ранньому прибутті зменшити максимальну швидкість, то розсіювання моментів прибуття стане більш компактним (рисунк 3.15, б). Носій розподілу випадкової величини $\tau(s_1)$ після зміни граничних швидкостей (v_1 на v_{11} , v_2 на v_{21}) звужиться порівняно з $[a_2(s_2), a_1(s_2)]$.

При аналізі даних визначено, що час ходу по кожній з елементарних ділянок у межах перегону розсіяний з відносним **СКВ**, що не перевищує 10 відсотків. У разі, якби не було поточного регулювання, носій щільності моментів прибуття на станцію значно перевищив би зазначену величину.

Реальні дані показують, що в ті періоди, коли відсутні серйозні збої в русі, системі оперативного регулювання вдається компенсувати збурення, підтримувати (приблизно) постійними ймовірнісні характеристики руху потоку. Так, для потоку однотипних (важких) вантажних поїздів ширина розсіювання залишається практично незмінною при русі поїздів по ділянці магістральної лінії протяжністю 100 км. (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 - Дисперсія моментів прибуття на станції, хв2

№ ст.	2	3	4	5	6	7	8
день	0,36	0,30	0,34	0,31	0,32	0,38	0,39
ніч	7,12	6,88	6,89	6,86	6,94	7,01	6,84

Результати дослідження також показують: у нічний період інтенсивність відхилень зростає, що пов'язано зі збільшенням потоку, а також з особливостями роботи машиністів і станцій у темну пору доби. Тенденція до стабілізації ширини розсіювання моментів прибуття і в цьому випадку зберігається. Описана закономірність порушується, коли регулюючий вплив системи (диспетчера, машиністів) недостатньо ефективний, не в змозі компенсувати вплив збурюючих факторів.

3.7 Трансформація розподілу моментів прибуття при регулюванні

Розсіювання випадкової величини $Y(s_1)$, що характеризує відхилення часу прибуття, має несиметричний характер. Хороша апроксимація цієї величини дається гамма-розподілом/

$$g(t; s_1) \approx \psi_0(t; \alpha, \beta) = I(t > 0) t^{\alpha-1} e^{-t/\beta} \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (3.55)$$

де $\alpha > 0$ $\beta > 0$ — параметри, $\Gamma(\cdot)$ — гамма-функція Ейлера. Відповідна випадкова величина Z має математичне сподівання $EZ = \alpha\beta$ та дисперсію $DZ = \alpha\beta^2$. Мода цього розподілу дорівнює $m = (\alpha - 1)\beta$.

Зауважимо, що в (3.55) точна рівність для всіх t виконуватися не може, оскільки поза проміжком $[a_2(s_1) - a_0(s_1), a_1(s_1) - a_0(s_1)]$ маємо $g(t; s_1) = 0$ — на відміну від $\psi_0(t; \alpha, \beta)$. Такий характер розподілу досить часто зустрічається на практиці. Тому заради більш точної апроксимації замість гамма-розподілу розглядатимемо його усічення, яке визначається нижче.

При аналізі досліджено рух поїздів у ранковий піковий період — з 6 до 10 год. Як приклад, проаналізовано дані для ділянки, обмеженої станціями $P(s_1)$ та $P(s_2)$ з координатами відповідно 115 км та 167 км. Для зазначених пунктів є реалізації обсягом $n = 50$ випадкових величин $Y(s_1)$, та $Y(s_2)$. Значення швидкості становлять:

$$v_0 = 75 \text{ км/год}, v_1 = 60 \text{ км/год}, v_2 = 90 \text{ км/год}.$$

Розрахункові моменти прибуття в точки s_1 і s_2 (у годинах) дорівнюють:

$$a_0(s_1) = 1.63, a_1(s_1) = 1.92, a_2(s_1) = 1.28,$$

$$a_0(s_2) = 2.23, a_1(s_2) = 2.78, a_2(s_2) = 1.86.$$

Звідси випливає, що носії щільностей $g(t; s_1)$ і $g(t; s_2)$ входять у відрізки $[-0.26, 0.38]$ і $[-0.37, 0.56]$ відповідно (одиниця — хвилини).

Нехай H_0 — гіпотеза, яка полягає в тому, що випадкова величина $Y(s_1)$ має розподіл із щільністю

$$g(t; s_1) = I(t \in [l, r])J(l, r)\psi_0(t - b; \alpha, \beta) \quad (3.56)$$

де $J(l, r) = \left(\int_l^r \psi_0(t - b; \alpha, \beta) dt \right)^{-1}$, $b \in R$ і $l \in r$ - деякі параметри, що визначаються за експериментальними даними.

Функція, що стоїть у правій частині рівності (3.56), являє собою «зріз» щільності $\psi_0(t - b; \alpha, \beta)$ на відрізку $[l, r]$. Перевіримо гіпотезу H_0 з двома рівнями значущості $\alpha_1 = 0.10$ і $\alpha_1 = 0.05$, використовуючи критерій Колмогорова. Варіаційний ряд, що відповідає вихідній вибірці, представлений у таблиці 3.2, де x_j^* — відхилення, n_j і w_j — спостережувані їхні числа та частоти. Тут і далі будемо вказувати часові величини в хвилинах.

Таблиця 3.2 — Вибірка значень відхилення від графіка (хв.)

j	1	2	3	4	5	6	7	8	Σ
x_j^*	-1	0	1	2	3	4	5	6	
n_j	2	16	14	8	4	2	2	2	50
w_j	0.04	0.32	0.28	0.16	0.08	0.04	0.04	0.04	1

За даними таблиці 3.2 визначаємо вибіркові величини: середнє $\bar{x} = 1.4$ і дисперсію $s_0^2 = 2.86$. Приймаючи $b = -0.8$, з наступної системи рівнянь:

$$\begin{cases} \bar{x} = \alpha\beta + b \\ s_0^2 = \alpha\beta^2 \end{cases}$$

знаходимо параметри розподілу $\alpha = 1.69$, $\beta = 1.3$.

Аналізуючи дані, можна висунути статистичну гіпотезу: вибірка взята з розподілу з щільністю (3.56). Відрізок, на якому здійснено «зріз» щільності, визначений основою гістограми, дорівнює $[-1,44; 6,48]$.

Критерій Колмогорова ґрунтується на статистиці $D_n = \sup |G_n^*(t; s_1) - G(t; s_1)|$, де $G_n^*(t; s_1)$ і $G(t; s_1)$ — емпірична та гіпотетична функції розподілу

величини $Y(s_1)$ (їхні графіки зображено на рисунку 3.16, б). Обчислення показують, що $D_n = 0.160$ менше за критичні значення $\lambda_n(0.1) = 0.173$ та $\lambda_n(0.05) = 0.192$. Отже, гіпотеза H_0 узгоджується з експериментальними даними за критерієм Колмогорова.

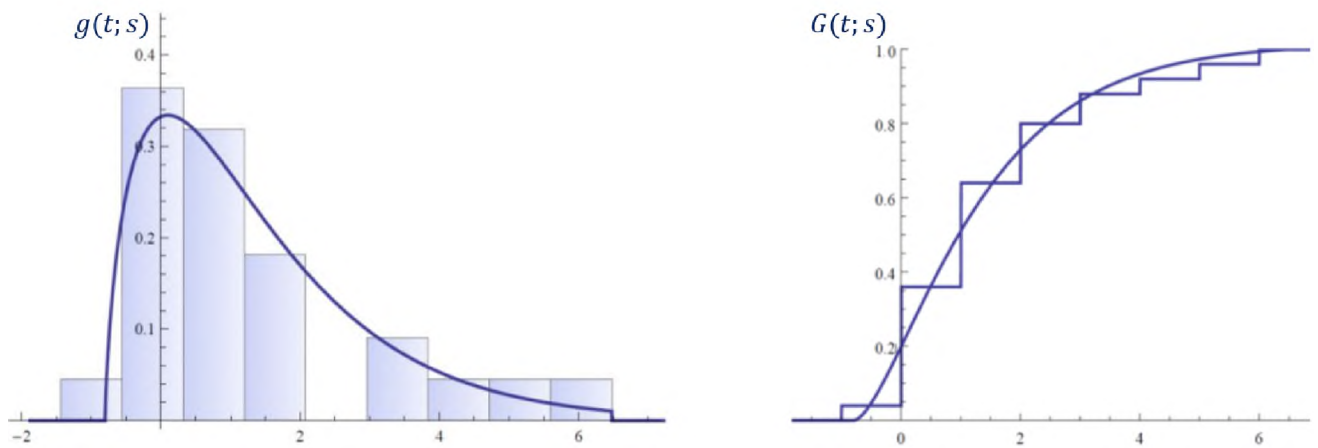


Рисунок 3.16 – Графіки функцій щільності $g(t; s_1)$ і розподілу $G(t; s_1)$

Щоб підтвердити припущення про те, що оперативне регулювання не змінює характер розподілу, проаналізуємо випадкову величину $Y(s_2)$ — час прибуття на кінцеву станцію дільниці. Підтвердимо наступну гіпотезу H_1 : випадкова величина $Y(s_2)$ розподілена з щільністю, що відповідає усіченому гамма-розподілу, тобто

$$g(t; s_2) = I(t \in [l, r])J(l, r)\psi_0(t - b; \alpha, \beta). \quad (3.58)$$

Побудуємо варіаційний ряд, що відповідає вихідній вибірці, визначимо вибіркові величини - середнє $\bar{x} = 1.3$ і дисперсію $s_0^2 = 11.03$. Приймаючи $b = -3.8$, знайдемо параметри розподілу (3.58)

$$\alpha = 2.36, \beta = 2.16.$$

Розрахункове значення статистичної величини $D_n = 0.161$ менше за критичне значення $\lambda_n(0.1) = 0.17$. Отже, гіпотеза H_1 узгоджується з експериментальними даними.

На рисунку 3.17 а зображені гістограма, побудована за вибіркою практично реалізованих значень величини $Y(s_2)$, та графіки функцій $g(t; s_2)$ і $\tilde{g}(t; s_2)$ з параметрами $\alpha = 2.36$, $\beta = 2.16$. Відрізок $[l, r]$, що характеризує усічення характеристики розсіювання, має межі $[-3,75, 12,75]$. Порівняння графіків, наведених на рисунках 3.16, а та 3.17, а, дозволяє зробити висновок, що в міру віддалення від початкової точки $P(0)$ спостерігається розширення носія щільності.

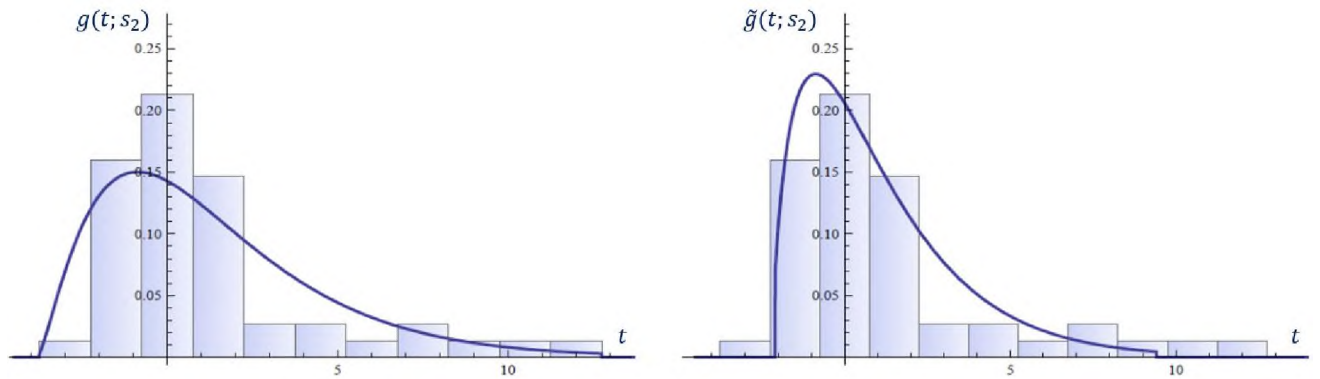


Рисунок 3.17 – Гистограма моментів прибуття в пункт $P(s_2)$ і функції щільності $g(t; s_2)$ (а) і $\tilde{g}(t; s_2)$ (б)

Тепер перевіримо, чи зберігається характер розподілу моментів у кінцевій точці $P(s_2)$ внаслідок застосування лінійного перетворення за допомогою співвідношення (3.54). Припускаємо, що в перерізі $P(s_1)$ присутній усічений гамма-розподіл. Висунемо статистичну гіпотезу $\overline{H}_1$ про те, що знову розрахована величина $Y(s_2)$ розподілена за усіченим гамма-законом. З урахуванням (3.50), запишемо щільність для цієї величини

$$\tilde{g}(t; s_2) = \frac{1}{|A(s_2)|} g\left(\frac{t - a_0(s_2) - B(s_2)}{A(s_2)} - a_0(s_1); s_1\right) = \frac{1}{|A(s_2)|} I(y \in [l, r]) J(l, r) \psi_0(y - b; \alpha, \beta) \Big|_{y = \frac{t - a_0(s_2) - B(s_2)}{A(s_2)} - a_0(s_1)}. \quad (3.59)$$

Справедливість другого рівності у виразі (3.59) впливає з того, що під час перевірки гіпотези H_0 було показано: випадкова величина $Y(s_1)$ підпорядковується усіченому гамма-закону.

Розрахунок проведено для розсіювання з колишніми параметрами $\alpha = 2.36$, $\beta = 2.16$ і $b = -1.5$. У результаті розрахунку визначено, що значення статистики $\tilde{D}_n = 0.1614$ менше критичної межі $\lambda_n(0.1) = 0.17$. Отже, гіпотеза $\tilde{H}_1$, як і H_1 , узгоджується з експериментальними даними за критерієм Колмогорова.

Випадкова величина $Y(s_2)$, змодельована з використанням лінійного перетворення, розподілена за усіченим гамма-законом. Графік відповідної щільності $\tilde{g}(t; s_2)$ показано на рисунку 3.17, б. Значення коефіцієнтів трансформації вихідного розсіювання $Y(s_1)$ у величину $Y(s_2)$, отримані з урахуванням співвідношення (3.51), дорівнюють: $A(s_2) = 1.45$, $B(s_2) = 0$. Носієм розподілу є відрізок $[-2.09, 9.41]$. Відповідний інтервал, визначений вище при аналізі розподілу $Y(s_1)$, лежить у межах $[-1.44, 6.48]$. Порівняння цих величин підтверджує, що в міру віддалення від початкової точки P_0 спостерігається посилення розсіювання моментів прибуття.

Незважаючи на те, що, згідно з розрахунками, обидві гіпотези H_1 і $\tilde{H}_1$ визнані такими, що не суперечать експериментальним даним, щільність (3.60) є більш придатною з практичної точки зору. З її допомогою можливе прогнозування розподілу відхилень прибуття на наступну станцію. Вхідними даними для такого прогнозу є граничні значення швидкості руху на перегоні та характеристика розподілу на попередній станції $P(s_1)$. На відміну від цього, використання щільності (3.58) не враховує цих даних і вимагає знання носія $[l, r]$ у пункті $P(s_2)$.

Крім того, використання щільності (3.60) не дозволяє розподілу «розповзтися», відсікає області розподілу, що відповідають малоймовірним подіям. Це дає можливість отримати більш реалістичний прогноз моментів прибуття поїздів у типові (слабозбурені) періоди часу.

3.8 Статистичні характеристики руху поїздів по дільницях

Вивчалися характеристики руху по головному електрифікованому колії. Досліджена лінія характеризується інтенсивним вантажно-пасажирським рухом зі стабільною спрямованістю потоків вантажних поїздів. Основну частину парного вантажного потоку становлять великогабаритні поїзди масою 4300 т. Магістраллю також курсують збірні поїзди та контейнерні маршрути.

Характеристика позаграфікових зупинок вантажних поїздів отримана шляхом обробки спостережень на дільниці Х-Б. На ділянці є вузьке місце довжиною 19 км (перегони 9-10). Регулярні короткочасні позаграфікові зупинки викликані труднощами з обробкою вантажних поїздів на технічній станції. Отримано 52 вибіркові значення випадкової величини $g(\tau_1)$ — тривалості первинної зупинки. За допомогою критерію Пірсона перевірено гіпотезу про те, що розподіл є показовим з параметром $\lambda = 0.26 \text{ хв}^{-1}$. На рисунку 3.18 наведено гістограму та графік гіпотетичної функції щільності.

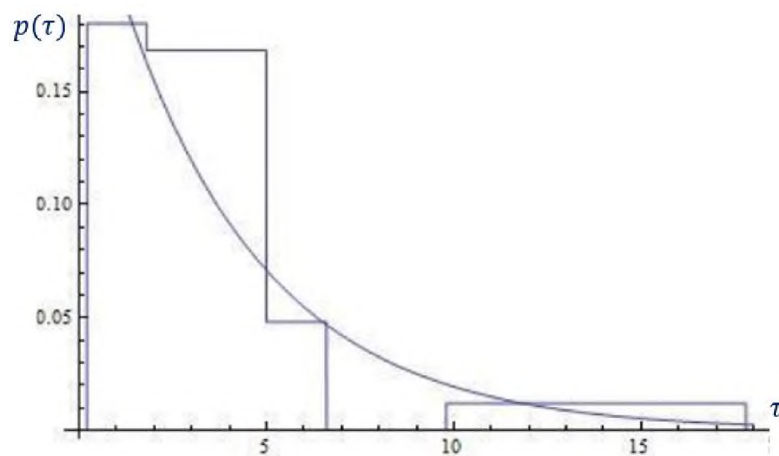


Рисунок 3.18 — Гістограма та графік гіпотетичної функції щільності

Визначено, що гіпотеза про показовий характер щільності узгоджується з експериментальними даними з рівнем значущості 0,05. Точніше, значення статистики $\chi^2 = 8,89$; при цьому критичне значення критерію, знайдене за допомогою розподілу з чотирма ступенями свободи, дорівнює 9,49. Отриманий

результат підтверджує висновки про експоненційний характер розподілу затримок.

Проаналізовано характеристики пунктуальності на ділянці двоколіїної магістральної залізничної лінії з інтенсивним вантажним рухом протяжністю 95 км. На ділянці розташовано 8 станцій. На прикордонних станціях здійснюється технічне обслуговування поїздів. У парному напрямку рухаються поїзди з нормативною масою 4300 т.

Результати дослідження показують, що середні значення часу ходу по перегонах практично не змінюються в різний час доби (таблиця 3.3). Однак дисперсія значно відрізняється вдень і вночі (таблиця 3.4).

Таблиця 3.3 - Математичне очікування часу ходу по перегонах, хв

№ ст.	2	3	4	5	6	7	8
день	10,8	11,6	7,3	19,6	17,0	23,4	21,6
ніч	13,0	12,5	7,8	19,5	18,4	23,4	21,9

Таблиця 3.4 - Дисперсія часу ходу по перегонах ділянки, хв²

№ ст.	2	3	4	5	6	7	8
день	8,23	5,70	0,46	3,34	3,76	11,46	23,02
ніч	26,9	4,76	1,11	4,68	9,32	5,50	7,69

У денний час, коли зростає інтенсивність потоку і з'являються ремонтні перерви, розсіювання часу проходження збільшується мірою руху поїздів по маршруту. Це відповідає моделі руху поїздів для ситуації, коли локальне регулювання є неефективним.

Експериментальні дані, що характеризують розподіл моментів прибуття поїздів, показують, що ймовірність їх запізнень істотно перевищує ймовірність дострокового прибуття. Це стосується всіх категорій поїздів: пасажирських, приміських та вантажних. При цьому щільність розподілу набуває асиметричної форми. Несиметричний розподіл доцільно наближати функцією Вейбулла або

гамма-розподілом. Вибір розподілу другого виду є більш кращим, оскільки дозволяє зменшити обсяг розрахунків.

На рисунку 3.19 показано динаміку зміни **СКВ** моментів прибуття під час руху вантажних поїздів. Значний розкид у нічний час зумовлений двома факторами: більш щільним потоком і поганими умовами видимості.

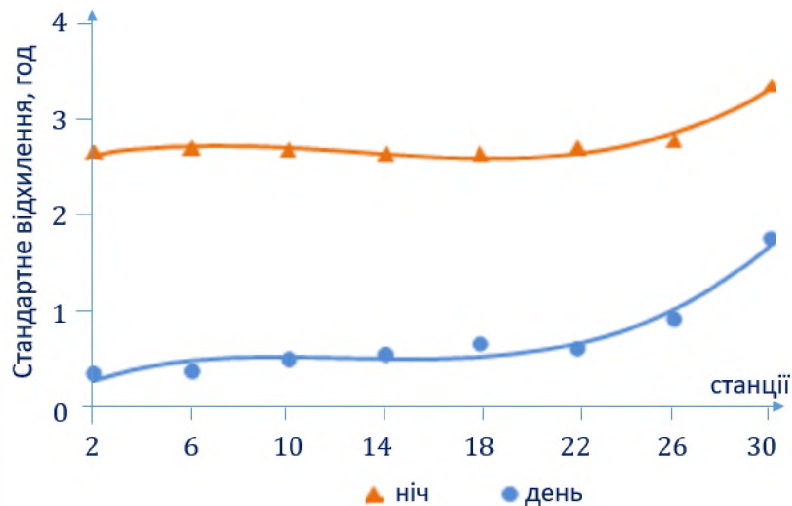


Рисунок 3.19 - Зміна **СКВ** моментів прибуття вантажних поїздів під час руху за маршрутом

Остання обставина має неоднаковий (непередбачуваний) вплив на роботу різних машиністів, що призводить до розсіювання часу прибуття.

На рисунку 3.20 наведено графік зміни середньоквадратичного відхилення під час руху парних контейнерних поїздів. Ширина розсіювання моментів прибуття на кінцеву станцію маршруту досягає 30 годин. Водночас середня величина запізнення не перевищує двох годин. Це також підтверджує, що диспетчери здатні контролювати лише детерміновану складову (часовий тренд) руху поїздів.

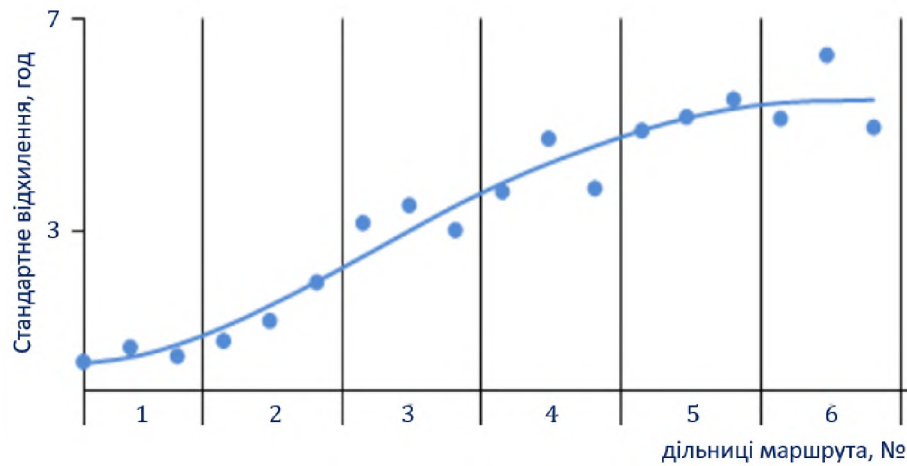


Рисунок 3.20 - Зміна **СДВ** моментів прибуття контейнерних поїздів

Основну частину дій, спрямованих на зменшення запізнення, персонал здійснює в період перебування поїзда на технічній станції. Запізнення компенсується шляхом скорочення часу обробки (рисунок 3.21). На графіку наведено відхилення операційних часів — часу руху та зупинок — від нормативних значень. На станціях відхилення можуть бути від’ємними, що відповідає скороченню середнього часу простою поїздів.

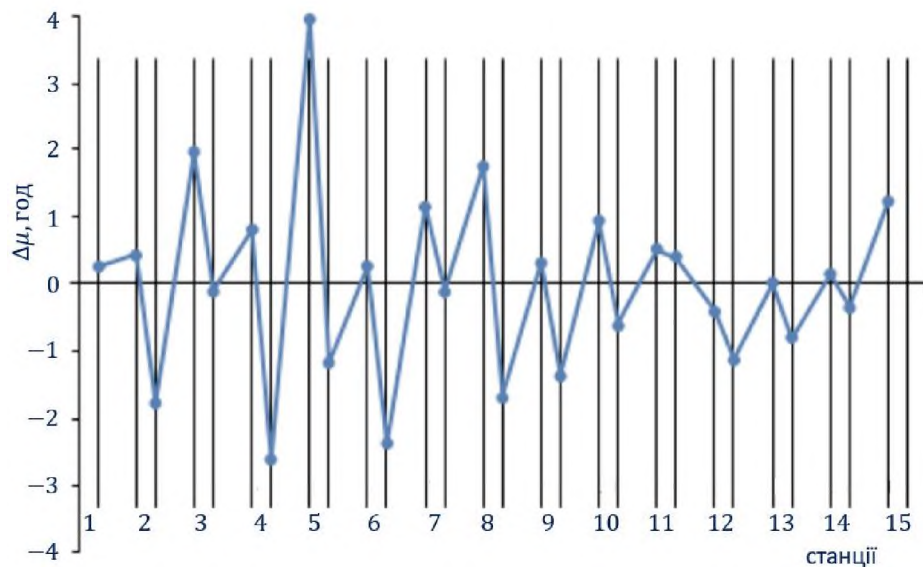


Рисунок 3.21 — Динаміка відхилень під час руху контейнерних поїздів

Під час вивчення пасажирського сегмента розглядалася ділянка двоколійної залізничної лінії з інтенсивним приміським рухом. Протяжність досліджуваної радіальної лінії становить 110 км, на ділянці розташовано 13

станцій. На кінцевих станціях здійснюється розворот поїздів. По дільниці курсують електропоїзди, що мають максимальну швидкість 120 км/год. Згідно з графіком руху, у години пік інтенсивність руху досягає 10 поїздів на годину (у кожному напрямку).

Аналіз статистичних даних показав, що розподіл часу ходу на більшості перегонів найкраще апроксимується зміщеним розподілом Вейбулла з коефіцієнтом форми $\alpha > 1$. Водночас на перегонах поблизу станцій, розташованих у житлових агломераціях з інтенсивним пасажиропотоком (станції 5, 6, 7), більш адекватною моделлю є зміщений показовий розподіл — окремий випадок розподілу Вейбулла з $\alpha = 1$.

Розподіли моментів прибуття поїздів на більшість станцій також досить добре апроксимуються розподілом Вейбулла з параметром $\alpha > 1$. На ряді станцій, де відбувається масова посадка/висадка пасажирів, форма розподілу моментів прибуття змінюється. Аналіз показує, що час прибуття на ці станції підпорядковується експоненційному закону.

У ранкові години пік (6–10 год.) такими пунктами є станція 3 (парний напрям, рух від мегаполісу) та станція 5 (непарний напрям). У період вечірнього піку (17-20 год.) максимум процесу пасажирообміну зміщується на станцію 7 (парний, непарний напрямки) і станцію 9 (непарний напрям).

Інтенсивність процесу посадки/висадки впливає на параметри розподілу моментів прибуття. У ранкові години пік при наближенні до центру мегаполісу зростає інтенсивність висадки пасажирів. Це спричиняє розширення зони розсіювання моментів прибуття (таблиця 3.5) на станції масового пасажиропотоку, носій розподілу збільшується.

Таблиця 3.5 - Параметри розподілів моментів прибуття (ранковий пік, непарний напрям руху), хв.

№ станції	11	9	7	5	3	1
середнє, $\bar{x}$	-0.12	0.65	1.40	1.54	1.1	1.3
дисперсія, s^2	1.15	1.12	2.86	9.97	10.21	11.03

У вечірній піковий період найбільше розсіювання спостерігається на станціях масової посадки 3, 5 (таблиця 3.6). При подальшому русі по маршруту відбувається звуження носія розподілу, що обумовлено наявністю активного регулювання з боку машиністів і диспетчера.

Таблиця 3.6 - Параметри розподілів моментів прибуття (вечірній пік, парний напрямок руху), хв.

№ станції	3	5	7	9	11	13
середнє, $\bar{x}$	0,78	0,83	0,57	1,26	1,43	-0,43
дисперсія, s^2	3,72	3,24	0,80	1,47	0,96	1,16

Мірою руху по маршруту також зростає і середнє запізнення поїздів. Лише на кінцевих станціях значення показника зменшується. Це свідчить про посилення регулюючих заходів з боку машиністів, оскільки якість їхньої роботи оцінюється за пунктуальністю прибуття на кінцеву станцію.

Графіки на рисунку 3.22 відображають процес накопичення запізнень під час руху приміських поїздів у ранкові пікові періоди - з 7.00 до 9.00.

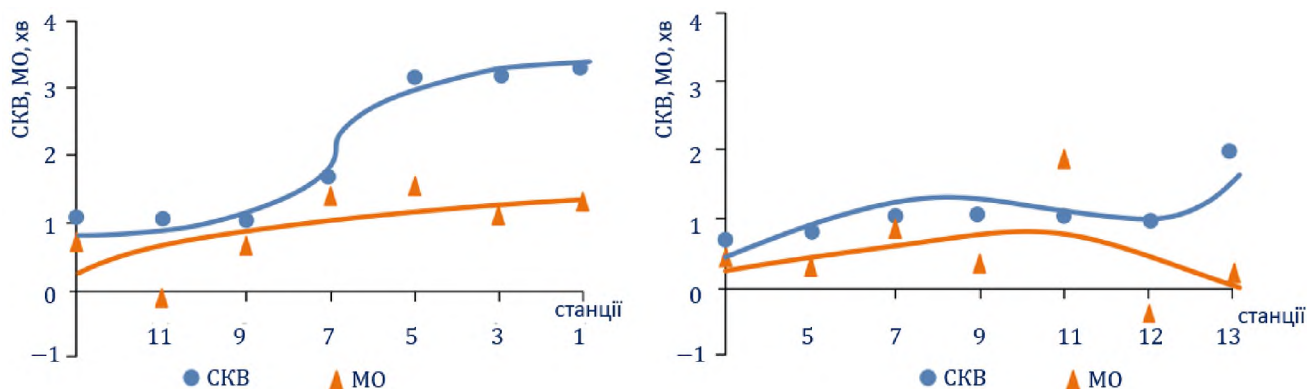


Рисунок 3.22 - Динаміка показників розсіювання моментів прибуття приміських поїздів під час руху по маршруту: а) у непарному напрямку (до центру мегаполісу) б) у парному напрямку

Характер зміни математичного очікування та СКВ вздовж маршруту підтверджує, що оперативне регулювання здатне коригувати середню величину запізнення, однак не може компенсувати вплив інтенсивних випадкових збурюючих факторів.

Встановлено, що вихідна функція описується розподілом Вейбулла з показником форми, що приблизно дорівнює 2. Для поїздів далекого прямування середня тривалість запізнень становить 560 с., середній зсув — (-200) с. Для вантажних поїздів ці параметри дорівнюють відповідно 1100 і 880 с.

4 Розрахунок економічного ефекту удосконалення управління змішаним вантажно-пасажирським потоком поїздів, в умовах оперативного коригування відхилень поїздів від ниток графіку руху

Показники ефективності заходів щодо удосконалення управління змішаним вантажно-пасажирським потоком поїздів поділяються на:

- показники економічної ефективності;
- ефективності зниження ризиків переходів руху в стан з ймовірними відмовами;
- ефективності скорочення обсягів збитків, зумовлених несвоєчасним прибуттям поїздів.

До показників економічної ефективності відноситься показник економічної ефективності конкретного заходу з удосконалення управління змішаним вантажно-пасажирським поїздопотоком, грн.

До показників ефективності зниження ризиків переходів руху в небезпечний стану відносяться:

- абсолютне зменшення ймовірності переходу руху поїзда в небезпечний стан – первинна затримка;
- абсолютне збільшення ймовірності руху поїзда без переходу в небезпечний стан - нагон поїздом нитки графіка;
- відносне зменшення ймовірності переходу руху поїзда в небезпечний стан – зменшення часу затримки;
- відносне збільшення ймовірності руху поїзда без переходу в небезпечний стан - виконання перегінного часу ходу;
- відносне зменшення ймовірності переходу руху поїзда в небезпечний стан на одиницю витрат – відсоток поїздів, що прибули за графіком;
- відносне збільшення ймовірності руху поїзда без переходу в небезпечний стан на одиницю витрат - відсоток загального часу знаходження поїзда на ділянці.

До показників ефективності скорочення обсягів збитків, зумовлених переходами руху в небезпечний стан відносяться:

- абсолютне зменшення тривалості несвоєчасного прибуття;
- відносне зменшення тривалості несвоєчасного прибуття
- відносне зменшення обсягу збитків від несвоєчасного прибуття.

4.1 Порядок розрахунку показників економічної ефективності заходів щодо удосконалення управління змішаним вантажно-пасажирським потоком поїздів

Показник економічної ефективності $E_{\text{зах}}$ конкретного заходу з удосконалення управління рухом поїздів обчислюється за формулою

$$E_{\text{зах}} = \sum_{i=0}^T (\Delta R_t - Z_t) \alpha_t \quad (4.1)$$

де T - горизонт розрахунку, рівний номеру кроку розрахунку, на якому проводиться ліквідація технічного засобу;

t - номер кроку розрахунку;

ΔR_t - величина зменшення обсягу збитків, зумовлених переходами руху в небезпечні стану, після впровадження заходу на t -кроку розрахунку, грн;

Z_t - витрати на реалізацію заходу на тому ж кроці, грн;

α_t - коефіцієнт приведення різних років до розрахункового року.

Витрати Z_t є початкові (капіталоутворювальні) витрати K_t , грн, поточні (експлуатаційні) витрати C_t , грн, і ліквідаційні витрати Λ_t , грн [72]

$$Z_t = K_t + C_t + \Lambda_t. \quad (4.2)$$

Сума дисконтованих капіталоутворювальних витрат за весь горизонт розрахунку T розраховується за формулою [72]

$$K = \sum_{i=0}^T (K_t) \frac{1}{(1+E)^t} \quad (4.3)$$

Сума дисконтованих поточних витрат розраховується за формулою [72]

$$C = \sum_{i=0}^T (C_t) \frac{1}{(1+E)^t} \quad (4.4)$$

Кроком розрахунку при визначенні показника ефективності t може бути місяць, квартал або рік.

Величина ΔR_t розраховується за формулою

$$\Delta R_t = R_{Bt} - R_{Mt}, \quad (4.5)$$

де R_{Bt} - обсяг збитків від переходів руху в небезпечний стану до впровадження заходів з підвищення безпеки руху, тобто при деякому базовому варіанті забезпечення безпеки руху на t -кроці розрахунку, грн;

R_{Mt} - обсяг збитків від переходів руху в небезпечний стану після впровадження заходу щодо підвищення безпеки руху на t -му кроці розрахунку, грн.

При необхідності вартісної оцінки результатів застосування заходу і обсягів витрат в світових, прогнозних і розрахункових цінах, а також при необхідності врахування інфляційних процесів слід користуватися [72]. Обсяг збитків R_{Bt} при деякій базовій системі забезпечення безпеки руху розраховується за формулою

$$R_{Bt} = \sum_{i=0}^{N_{Обе}} R_{Bit} \quad (4.6)$$

де $N_{Обе}$ - кількість переходів руху поїздів в небезпечний стан протягом t -кроку розрахунку при базовій системі, тобто до впровадження заходів з удосконалення управління;

R_{Bit} - обсяг збитків при i -му переході руху в небезпечний стан.

У ряді випадків $R_{Бt}$ зручно розраховувати за формулою

$$R_{Бt} = N_{ПБt} \cdot Q_{ОБt} \cdot R_{БС1t} = N_{ОБt} \cdot R_{БС1t} \quad (4.7)$$

де $N_{ПБt}$ - число поїздів, які пройшли по полігону на t -кроку розрахунку;

$Q_{ОБt}$ - ймовірність переходу руху поїзда в небезпечний стан при їх проходженні по полігону при базовій системі, тобто до впровадження заходів щодо удосконалення управління рухом поїздів на t -кроку розрахунку

$$Q_{ОБt} = \frac{N_{ОБt}}{N_{ПБt}}, \quad (4.8)$$

де $R_{БС1t}$ - середній обсяг збитків на один перехід руху в небезпечний стан на певному полігоні на t -кроку розрахунку.

Величина збитків R_{Mt} на тому ж полігоні протягом кроку розрахунку внаслідок переходів руху в небезпечний стан після реалізації заходу М на t -кроці розрахунку визначається за формулою

$$R_{Mt} = N_{Пt} \cdot Q_{ОMt} \cdot R_{МС1t} = N_{ОMt} \cdot R_{МС1t} \quad (4.9)$$

де $N_{Пt}$ - число поїздів, які пройшли по полігону на t -кроку розрахунку;

$Q_{ОMt}$ - ймовірність переходу руху поїзда в небезпечний стан при їх проходженні по полігону після впровадження заходів щодо удосконалення пропуску поїздів по дільниці на t -кроку розрахунку;

$R_{МС1t}$ - очікуваний середній обсяг збитків при переході руху в небезпечний стан на t -кроку наміру після впровадження заходи щодо удосконалення пропуску поїздів по дільниці, грн;

$N_{ОMt}$ - кількість переходів руху в небезпечний стан протягом кроку розрахунку після впровадження заходів щодо удосконалення пропуску поїздів по дільниці;

$$N_{OM_t} = N_{Пт} \cdot Q_{OM_t}. \quad (4.10)$$

Якщо впроваджуваний захід впливає лише удосконалення пропуску поїздів, тобто на величину Q_{OM_t} , то у формулі можна допустити рівність середніх обсягів збитків, що припадають на один перехід руху в небезпечний стан, як до, так і після впровадження заходу $R_{МС1_t} = R_{БС1_t}$. У тих випадках, коли впроваджуваний захід зменшує обсяг збитків за рахунок зниження ступеня впливів вражаючих чинників, що виникають при переходах руху в небезпечний стан, необхідно враховувати ступінь зменшення $R_{МС1_t}$ в порівнянні з $R_{БС1_t}$. Величини ймовірностей переходів руху поїздів в небезпечний стан (S_0), тобто величини $Q_{ОБ_t}$ і Q_{OM_t} залежать від ймовірностей $Q(F_0)$ виникнення небезпечних дестабілізуючих факторів F_0 , тобто небезпечних відмов технічних засобів, небезпечних помилок персоналу і небезпечних помилок програмних засобів, і від умовних ймовірностей $Q(\frac{S_0}{F_0})$ переходу руху поїзда в небезпечний стан (S_0), якщо виникає небезпечний дестабілізуючий фактор (F_0). Тому величини $Q_{ОБ_t}$ і Q_{OM_t} можуть бути розраховані через $Q(F_0)$ та $Q(\frac{S_0}{F_0})$ за допомогою наступних формул

$$Q_{ОБ_t} = Q_{Б_t}(F_0) \cdot Q_{Б_t}(\frac{S_0}{F_0}) \quad (4.11)$$

та

$$Q_{OM_t} = Q_{М_t}(F_0) \cdot Q_{М_t}(\frac{S_0}{F_0}) \quad (4.12)$$

де $Q_{Б_t}(F_0)$ - ймовірність виникнення небезпечного дестабілізуючого чинника (F_0) при зменшенні затримок поїздів базовою системою;

$Q_{М_t}(F_0)$ - ймовірність виникнення небезпечних дестабілізуючого чинника (F_0) після впровадження заходу M ;

$Q_{B_t}(\frac{S_0}{F_0})$ - умовна ймовірність переходу руху поїзда в небезпечний стан S_0 , якщо виник небезпечний дестабілізуючий фактор F_0 при управлінні рухом поїздів базової системою;

$Q_{M_t}(\frac{S_0}{F_0})$ - умовна ймовірність переходу руху поїзда в небезпечний стан S_0 , якщо виник небезпечний дестабілізуючий фактор F_0 після впровадження заходу М.

Для підвищення безпеки руху застосовують системи парирування небезпечних відмов. Функціями таких систем є виявлення небезпечних відмов і дефектів і вживання заходів щодо запобігання їх впливів на рух поїзда. Величина ΔR_t для системи парирування дефектів розраховується за формулою

$$\Delta R_t = \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{n=1}^{N_d} y_k \cdot Q(\frac{S_{0k}}{F_i}) \cdot Q(\frac{F_i}{D_{нп}}) \cdot N_{ont} \quad (4.13)$$

де N_k - число видів небезпечних станів руху;

S_{0k} - небезпечний стан руху k -го виду;

y_k - середній обсяг збитку при переході руху в небезпечний стан k -го виду;

N_i - число видів небезпечних відмов;

F_i - небезпечна відмова i -го виду;

$Q(\frac{S_{0k}}{F_i})$ - ймовірність переходу руху в небезпечний стан руху k -го виду S_{0k} , якщо

виник небезпечна відмова i -го виду F_i ;

N_d - число видів дефектів;

$D_{нп}$ - невиявлені дефект n -го виду;

$Q(\frac{F_i}{D_{нп}})$ - ймовірність виникнення небезпечної відмови i -го виду F_i , якщо має

місце невиявлені дефект n -го виду $D_{нп}$;

N_{ont} - число дефектів n -го виду, виявлених системою за t -крок розрахунку;

$$Q(\frac{S_{0k}}{F_i}) = \frac{N_{0kt}}{N_{fi}}, \quad (4.14)$$

де N_{0k_t} - число випадків переходів у небезпечний стан руху k -го виду внаслідок дії небезпечної відмови i -го виду

N_{fi} - кількість випадків виникнення небезпечних відмов i -го виду.

$$Q\left(\frac{F_i}{D_{\text{нп}}}\right) = \frac{N_{fm}}{N_{\text{нп}}}, \quad (4.15)$$

де N_{fm} - кількість випадків виникнення небезпечних відмов i -го виду через вплив невиявлених дефектів n -го виду;

$N_{\text{нп}}$ - кількість невиявлених запізнь n -го виду.

Для систем парировання небезпечних відмов величина ΔR_t розраховується за формулою

$$\Delta R_t = \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{i=1}^{N_I} y_k \cdot Q\left(\frac{S_{0k}}{F_i}\right) \cdot N_{it} \quad (4.16)$$

де N_{it} - число небезпечних відмов i -го виду, виявлених системою за t -крок розрахунку.

Залежно від характеру наявних статистичних даних для оцінки заходів з підвищення якості управління рухом поїздів використовують формулу (4.5), (4.13) або (4.16). Показник економічної ефективності (4.1) може використовуватися для оцінки ефективності заходів щодо удосконалення руху поїздів як з точки зору інтересів держави, так і з точки зору інтересів тільки АТ «Укрзалізниця». У першому випадку необхідно враховувати витрати і збитки всіх фізичних осіб - пасажирів і всіх юридичних осіб (держави, підприємств з різною формою власності) – вантажовідправників, в першу чергу. У другому випадку при розрахунку показника ефективності необхідно враховувати лише витрати і збитки, які несе АТ «Укрзалізниця». При цьому до складу витрат включають одноразові і поточні витрати АТ «Укрзалізниця» без повторного розрахунку.

4.2 Розрахунок економічної ефективності від впровадження автоматизованої системи управління рухом поїздів на змішаних дільницях

Вихідні дані. Для функціонування системи необхідними є одноразові капітальні витрати (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1-Одноразові капітальні витрати

Найменування витрати	Вартість одиниці, тис.грн.	Кількість одиниць	Витрати, тис. грн.
Впровадження ЄАСУРП:			
- повний цикл розробки;	900	1	900
- встановлення та налаштування.	2	40	80
Витрати на підготовку кадрів та підвищення кваліфікації	17,5	40	700
Всього			1660

2 Середньорічна ставка комерційного банку по депозитним внескам – 12%.

3 Очікуваний середньорічний процент інфляції в період 2027-2031 р.р. - 9%;

4 Здійснення заходу передбачає ризики – 1%;

5 За розрахунковий прийнято перший рік життєвого циклу товару.

Розрахунок сукупного приросту економічного ефекту визначимо за формулою 4.1. При цьому різночасні витрати й результати повинні бути приведені до одного (першого) для всіх варіантів заходу моменту часу, для чого використовується коефіцієнт приведення α_i . Коефіцієнт приведення витрат різних років до першого року розрахункового періоду з урахуванням інфляційного очікування α_{π} ,

$$\alpha_t = \frac{1}{[(1+E_{\pi})(1+I+R)]^{t_k-t_p}}, \quad (4.17)$$

де E_{π} - норматив приведення різночасних витрат і результатів, чисельно дорівнює коефіцієнту ефективності капітальних вкладень (річна ставка банків за депозитними внесками);

t_p - порядковий номер останнього року розрахункового періоду;

t_k - порядковий номер року здійснення заходу, що приводиться до розрахункового (першого) року;

I - очікуваний середньорічний темп інфляції протягом життєвого циклу проекту, %;

R - ризик здійснення проекту, %.

$$\alpha_{2027} = \frac{1}{[(1+0,12)(1+0,09+0,01)]^0} = 1;$$

$$\alpha_{2028} = \frac{1}{[(1+0,12)(1+0,09+0,01)]^1} = 0,81;$$

$$\alpha_{2029} = \frac{1}{[(1+0,12)(1+0,09+0,01)]^2} = 0,66;$$

$$\alpha_{2030} = \frac{1}{[(1+0,12)(1+0,09+0,01)]^3} = 0,53;$$

$$\alpha_{2031} = \frac{1}{[(1+0,12)(1+0,09+0,01)]^4} = 0,43;$$

Експлуатаційні витрати C_t , пов'язані з обслуговування та супроводом програмного забезпечення передбачено в рамках діючої системи із загальною сумою 40 тис. грн/рік.

За розрахунками у розділі 3 обсяг загальних відшкодування за транспортні події за 2023 рік на залізниці склав 4557,226 млн. грн.

Зменшення витрат на відшкодування за транспортні події можна визначити наступним чином

$$\Delta E_{\text{вт}} = N_{\text{заг}} \cdot \Delta P_{\text{ф}} \cdot L, \quad (4.18)$$

де $N_{\text{заг}}$ – кількість поїздів, що прямують по мережі, $N_{\text{заг}} = 190000$ поїздів/рік;

$\Delta P_{\text{ф}}$ – зміна ймовірності виникнення запізнення зумовленого певним фактором;

L - середня величина відшкодування у разі виникнення запізнень, $L = 34524$ грн. [73],

Згідно досліджень [74, 75] впровадження автоматизованих систем управління позитивно впливає на ймовірності розвитку виконання графіку руху. На основі досвіду застосування аналогічних систем зменшення ризику первинних затримок $\Delta P_{\text{ф}}^{\text{пер}} = 4,2 \cdot 10^{-6}$ вторинних затримок $\Delta P_{\text{ф}}^{\text{втор}} = 1,8 \cdot 10^{-6}$. Таким чином зменшення витрат від зазначених факторів складуть:

$$\Delta E_{\text{вит}}^{\text{пр}} = 190000 \cdot 4,2 \cdot 10^{-6} \cdot 34524 = 27550,152 \text{ грн};$$

$$\Delta E_{\text{вит}}^{\text{тех}} = 197100 \cdot 1,8 \cdot 10^{-6} \cdot 34524 = 11807,208 \text{ грн}.$$

Розрахунок обсягів загальних витрат на реалізацію проекту та економічний ефект наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Розрахунок сукупного приросту економічного ефекту від впровадження системи

Найменування витрати	Рік				
	2027	2028	2029	2030	2031
1	2	3	4	5	6
1 Витрати на підготовку кадрів та підвищення кваліфікації тис. грн.	700				
2 Встановлення, підключення, обладнання необхідним програмним забезпеченням тис.грн.	980				
3 Всього одноразових витрат, тис. грн.	1680	0	0	0	0
4 Експлуатаційні витрати, пов'язані з обслуговування та супровідом програмного забезпечення тис.грн.	40	40	40	40	40
5 Всього витрат, тис. грн.	1720	40	40	40	40
6 Економія за рахунок покращення оперативного управління експлуатаційної роботи, тис. грн.	27550,152	27550,152	27550,152	27550,152	27550,152
7 Зменшення збитків з причин первинних затримок, тис. грн.	11807,208	11807,208	11807,208	11807,208	11807,208
8 Зменшення збитків з причин вторинних затримок, тис. грн.	1099,13	1099,13	1099,13	1099,13	1099,13
9 Загальна економія, тис. грн./рік	40456,49	40456,49	40456,49	40456,49	40456,49
10 Економічний ефект, тис. грн./рік	38736,49	40416,49	40416,49	40416,49	40416,49
11 Коефіцієнт приведення до розрахункового року	1	0,81	0,66	0,53	0,43
12 Економічний ефект з урахуванням коефіцієнту приведення, тис.грн./рік	38736,49	32737,36	26674,88	21420,74	17379,09
13 Економічний ефект наростаючим підсумком, тис.грн./рік	38736,49	71473,85	98148,73	119569,47	136948,56

На основі розрахунків, бачимо що економічний ефект від розробки та впровадження єдиної автоматизованої системи управління рухом поїздів на змішаних дільницях понад 136,9 млн. грн.

Висновки

1 Розглянуто, що модель процесу оперативного планування та керівництва рухом поїздів – результат системного аналізу принципів організації інформаційних та керуючих процесів у системі диспетчеризації. Такі моделі служать теоретичною основою вдосконалення системи поточного управління експлуатаційної роботи на полігоні залізниці.

2 Аналіз статистичних досліджень показав, що під час ковідних обмежень відбулося різке падіння обсягів перевезень, однак за період 2023-2025 рр кількість перевезеного вантажу на залізницях Європи стабілізувалась. Ситуація в Україні погіршилася через воєнні дії, однак за вказаний період обсяги перевезення є стабільними. Номенклатура вантажів залишилась без змін, а показник імпортних перевезень зріс на 11%.

3 Динаміка пунктуальності прибуття на залізницях Європи залишається на рівні 85 – 95 %, при чому більш пунктуальними є пасажирські поїзди. На українських залізницях, не зважаючи на складну енергетичну ситуацію, рівень пунктуальності досягає 82%.

4 Запропоновано спосіб оперативного коригування графіка руху поїздів, що передбачає виділення періодів із цілеспрямовано збільшеними нормативами ходових часів (зон економічного пропуску) при зниженні інтенсивності потоку. Технологія превентивного регулювання, що гнучко використовує різні режими пропуску вантажного потоку, дозволяє на порядок знизити рівень ризику економічних втрат, максимально реалізувати потенціал інтелектуалізації та цифровізації в оперативному управлінні рухом поїздів.

5 Запропоновано розглядати процесу руху поїздів як стохастичну модель в мінливих експлуатаційних умовах, що враховують реальну статистику руху. Результатами дослідження є методика розрахунку відхилень від графіка та опис механізму причинно-наслідкових зв'язків у процесі формування запізнень. Імовірнісне прогнозування порушень графіка з використанням нової методики

дозволяє підвищити ефективність диспетчерських регулювань, зменшити кількість неграфікових зупинок у 2-3 рази.

6 Визначено, що в результаті оперативного коригування графіка з використанням моделювання потоку поїздів пунктуальність руху збільшується не менше ніж на 10 пунктів, поточні експлуатаційні витрати знижуються на 8% і більше.

7 Визначено, що реалізація запропонованих алгоритмів коригування графіка при вирішенні практичних завдань, комплексному використанні критеріїв пунктуальності та ефективності дозволяє отримати річну економію витрат на пропуск у межах АТ «Укрзалізниця» у розмірі понад 11 млн. грн. за рахунок зниження витрат від неграфікових зупинок та штрафів за прострочення доставки вантажів.

Список використаних джерел

- 1 Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року : Указ Президента України за № 722/2019 від 30 вересня 2019 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text>.
- 2 Попов М.Д., Малахова О.А., Ніжегольцев В.А. Удосконалення порядку визначення пропускної спроможності залізничної дільниці при непаралельному графіку руху // *Тези стендових доповідей та виступів учасників 38 міжнародної науково-практичної конференції "інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті" (9-10 жовтня 2025)*. Харків. ІКСЗТ, 2025 №3 (додаток). С. 107-108.
- 3 Малахова О.А., Попов М.Д., Ніжегольцев В.А. Удосконалення методів розрахунку пропускної спроможності залізничних дільниць з урахуванням резервів для стабілізації графіків руху // *Тези доповідей 6-ої міжнародної науково-технічної конференції «ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ» (24–26 листопада 2025 р.)*. Харків: УкрДУЗТ, 2025. С. 75-77.
- 4 D'Ariano A. Improving Real-Time Train Dispatching: Models, Algorithms and Applications: PhD thesis / D'Ariano Andrea. The Netherlands, 2008. 230 p.
- 5 Florian Fuchs, Bernardo Martin-Irad, Francesco Corman. Optimizing periodic stability in railway timetables: A microscopic model for networks with a macroscopic comparison. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. Volume 36, December 2025, 100555. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2025.100555>.
- 6 Rúben Silva at all. Early Identification of Unbalanced Freight Traffic Loads Based on Wayside Monitoring and Artificial Intelligence. *Sensors*. January 2023.23(3):1544. DOI:10.3390/s23031544. <https://doi.org/10.3390/s23031544>.
- 7 Johanna Törnquist Krasemann. Computational decision-support for railway traffic management and associated configuration challenges: An experimental study. *Journal of Rail Transport Planning & Management* Volume 5, Issue 3, November 2015, Pages 95-109. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2015.09.002>.

- 8 Jovanovic D.N. Improving railroad on-time performance: Models, algorithms and applications: PhD Thesis / D.N.Jovanovic. *University of Pennsylvania*, 1989. 162 p.
- 9 Suharko A. Tactical Network Flow and Discrete Optimization Models and Algorithms for the Empty Railcar Transportation Problem : PhD thesis / A.Suharko. Blackburg, Virginia, 1997. 106 p.
- 10 Törnquist J. Computer-based decision support for railway traffic scheduling and dispatching: A review of models and algorithms / J.Törnquist // *5th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS 2005)*, Palma de Mallorca, Spain, 2005. P. 218-237.
- 11 Salido M.A. Robustness in Railway Transportation Scheduling /M.A.Salido,F.Barber,L.Ingolotti // *7th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA „08)*, Chongqing, China, June 2008. P. 2833-2837.
- 12 Goverde, R.M.P. Punctuality of Railway Operations and Timetable Stability Analysis : PhD thesis / Goverde R. *Technical University of Delft*, 2005. 165 p.
- 13 Ingvardson, Jesper Bláfoss; Nielsen, Otto Anker; Raveau, Sebastián; Nielsen, Bo Friis. Passenger arrival and waiting time distributions dependent on train service frequency and station characteristics: A smart card data analysis. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*. 2018. 90, 292-306. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.03.006>.
- 14 Malishevskaya A. Development of transport and transport systems. *Organization of scientific research in modern conditions*. March. 2023. DOI: [10.30888/2709-2267.2025-30-00-017](https://doi.org/10.30888/2709-2267.2025-30-00-017).
- 15 Aseltine J.A. A survey of adaptive control systems / J.A.Aseltine, A.R.Mancini, C.W.Sarture // *IRE Trans. on Automatic Control*. 1958. vol. AC-6. No. 12. P. 102–108.
- 16 Bellman R. Dynamic programming and adaptive control processes: Mathematical foundations / R.Bellman, R.Kalaba // *IRE Transactions on Automatic Control*. 1960. vol. AC-5. P. 5–10.
- 17 Narendra K.S. Adaptive control using multiple models. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1997. vol. 42. №2. P. 171–187.

- 18 Tou J.T. Modern Control Theory / J.T.Tou // N.-Y. : McGraw-Hill Book. Co., Inc., 1964. 343 p.
- 19 Traxel D. Self-Adjusting Systems: A Review Paper / D. Traxel // "Discrete and Self-Adjusting Systems": Proc. of the 2nd International IFAC Congress. 1965. Pp. 240–251.
- 20 Suteewong W. Algorithms for solving the train dispatching problem for general networks: PhD thesis / *W.Suteewong*. University of Southern California. 2006. - 128 p.
- 21 Schaafsma A. Dynamisch rail verkeersmanagement, besturings-concept voor rail verkeer op basis van het Lagenmodel Verkeer en Vervoer : PhD thesis / A.Schaafsma. - Delft, The Netherlands, 2001. 165 p.
- 22 Aravind Sasidharan Pillai. Traffic management: implementing ai to optimize traffic flow and reduce congestion. *SSRN Electronic Journal*. January 2024. [DOI:10.2139/ssrn.4916398](https://doi.org/10.2139/ssrn.4916398).
- 23 Pacciarelli D. Introduction and classification of existing rescheduling literature / D.Pacciarelli // *5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, Copenhagen*, 13-15 May, 2013. P. 125-138.
- 24 D'Ariano A. Conflict Resolution and Train Speed Coordination for Solving Real-Time Timetable Perturbations / A.D'Ariano, M.Pranzo, I.Hansen // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2007. 8(2). P. 208-222.
- 25 Quan Lu. Modeling Train Movements through Complex Rail Networks / Quan Lu, M.Dessouky, R.C.Leachman // *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*. 2004. vol.14. P. 32-76.
- 26 Huisman D. Operations research in passenger railway transportation : research paper / D.Huisman, L.Kroon, R.Lentink, M.Vromans // *Erasmus Research Institute of Management (ERIM)*, 2005. № ERS-2005-023-LIS. 46 p.
- 27 Mes M. Comparison of agent-based scheduling to look-ahead heuristics for real-time transportation problems / M.Mes, A.van der Heijden, N.van Harten // *European Journal of Operational Research*. 2007. 181(1). P. 59-75.

- 28 Törnquist Krasemann, J. Design of an effective algorithm for fast response to the rescheduling of railway traffic during disturbances / J.Törnquist Krasemann // *Transportation Research, Part C*. 2012. 20(1). P. 62-78.
- 29 Shah N. Price and Frequency Competition in Freight Transportation / N.Shah,J.K.Brueckner // Transportation Center. Irvine: University of California, 2011. UCTC-FR-2011-15. 38 p.
- 30 Ghosh S. Fundamental issues in intelligent transportation systems / S.Ghosh // *Journal of Rail and Rapid Transit: Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part F*. 1999. vol. 213. № 2, March 1. P. 125-131.
- 31 . Gordon, R. Intelligent Freeway Transportation Systems. Functional Design / R.Gordon. *Springer*. 2009. 215 p.
- 32 Ditmeyer S.R. Weather Information and Intelligent Railroad Systems / S.R.Ditmeyer // *FRA - AAR - NCAR Symposium on Enhanced Weather Information for Improved Railroad Safety and Productivity*. Boulder, Colorado, Oct. 17-18 2001. P. 91-105.
- 33 Wang Zhuo. The Theory and Method of Design and Optimization for Railway Intelligent Transportation System (RITS) / Wang Zhuo,Jia Li-min. Bentham eBooks, 2011. 148 p.
- 34 Блиндюк Р.В. Розвиток інтелектуальних технологій управління НА залізничному транспорті. // Проблеми транспортного комплексу України. Вісник економіки транспорту і промисловості. 2012. №39. С. 89-93.
- 35 Токмакова І.В. Інтелектуальні технології удосконалення адаптивного управління на залізничному транспорті. // Вісник економіки транспорту і промисловості. № 50. 2015. С. 309-313.
- 36 Бутько Т.В. і інші. Формування процедури надання пріоритету при просуванні вантажних поїздів в експортному сполученні в умовах ризиків. // *Тези доповідей 6-ої міжнародної науково-технічної конференції «ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ» (24–26 листопада 2025 р.)*. Харків: УкрДУЗТ, 2025. С. 36-38.

- 37 Прохорченко Г.О., Лукін О.О., Серета Д.Д. Удосконалення схем обігу швидкісних пасажирських поїздів на основі автоматизації. // *Тези доповідей 5-ої міжнародної науково-технічної конференції «ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ» (25–27 листопада 2024 р.)*. Харків: УкрДУЗТ, 2024. С. 108-110.
- 38 Прохорченко А.В., Киман А.М., Харченко Д.Р. Удосконалення процедур пріоритетизації поїздопотоків в умовах дефіциту залізничної інфраструктури // *Тези доповідей 5-ої міжнародної науково-технічної конференції «ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ» (25–27 листопада 2024 р.)*. Харків: УкрДУЗТ, 2024. С. 102-104.
- 39 Торопов Б.І та інші. ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОСНАЩЕННЯ ТЕХНІЧНИХ СТАНЦІЙ. / Б.І. Торопов, О.Г. Стрелко, Т.М. Грушевська, Т.В. Болвановська // *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 33 (72) № 5 2022. С. 318-324.
- 40 Wüst R. A Multi-Component Closed-Loop Control Framework for Railway Networks / R.Wüst et al. // *12 th Swiss Transport Research Conference*. - Monte-Verita, May 2-4, 2012. P. 1-34.
- 41 Симутін О.Ю., Пасторова В.В., Г.О. Прохорченко. Автоматизація розрахунку графіка руху поїздів на прикордонній дільниці при наданні технологічних «вікон»// *Тези доповідей 6-ої міжнародної науково-технічної конференції «ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ» (24–26 листопада 2025 р.)*. Харків: УкрДУЗТ, 2025. С. 110-111.
- 42 Rodriguez J. A constraint programming model for real-time train scheduling at junctions / J.Rodriguez // *Transportation Research, Part B*. 2007. 41 (2). P. 231–245.
- 43 Bai Yun. Train Control to Reduce Delays upon Service Disturbances at Railway Junctions / Bai Yun, Ho Tinkin, Mao Baohua // *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. 2011. 11(5). P. 114-122.

- 44 Davydov B. Stochastic Traffic Models for the Adaptive Train Dispatching / B.Davydov, V.Chebotarev, A.Godyaev // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016. vol. 451. P. 323–333.
- 45 Muhlhans E. Berechnung der Verspätungsentwicklung bei Zugfahrten / E.Muhlhans // *Eisenbahntechn. Rundschau ETR*. 1990. vol. 39. (7/8). P. 465–468.
- 46 Van Den Boom T.J.J. Permutation-based algorithm to optimally reschedule trains in a railway traffic network / T.J.J.Van den Boom et al. // *Proc. of the 18th IFAC World Congress*. Milano, Italy, 2011. P. 9537–9542.
- 47 D'Acerno L. Defining Robust Recovery Solutions for Preserving Service Quality during Rail/Metro Systems Failure / L.D'Acerno, et al. // *Intern. Journal of Supply and Operations Management*. 2016. vol.3. Iss. 3. P. 1351- 1372.
- 48 Chaudhury I.A. A research survey: review of flexible job shop scheduling techniques / I.A.Chaudhury, A.A.Khan // *International Transactions in Operational Research*. 2016. vol. 23. Iss. 3. P. 551-591.
- 49 Carey, M. Exact heuristic measures of schedule reliability / M.Carey, S.Carville // *Journal of Operational Research Society*. 2000. 51. P. 666–682.
- 50 Abril M. An assessment of railway capacity / M.Abril et al. // *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*. 2008. vol. 44. № 5. P. 774-806.
- 51 Bertsimas D. The price of robustness / D.Bertsimas, M.Sim // *Operations Research*. 2004. vol. 52. P. 35–53.
- 52 Vromans M. Reliability and heterogeneity of railway services / M.Vromans, R.Dekker, L.G.Kroon // *European Journal of Operational Research*. 2006. 172. P. 647–665.
- 53 Hebrard E. Robust solutions for constraint satisfaction and optimization / E.Hebrard, B.Nich, T.Walsh // *Proc. of the 16th European Conference on AI (ECAI 2004)*. 2004. P. 186–190.
- 54 Van Den Boom T.J.J. On a model predictive control algorithm for dynamic railway network management / N.J.J.Van Den Boom, B.De Schutter // *Proc. of the 2nd Internat. Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, Hannover*,

Germany, 2007. URL : <https://www.bartdeschutter.org/publications/07-009-model-predictive-control-algorithm/07-009-model-predictive-control-algorithm.pdf>.

55 De Shutter B. A. Model Predictive Control Approach for Recovery from Delays in Railway Systems / B.De Shutter,T.J.Van Den Boom, A.Hegyi // *Transportation Research Record*. 2002. 1793. P. 15–20.

56 Dessouky M. Strategies for effective rail track capacity usage / M.Dessouky et al. // *METRANS project: final report*. California, Jan. 2010. 64 p.

57 Lamorgese L. An exact decomposition approach for the real-time train dispatching problem / L.Lamorgese, C.Mannino // *SINTEF: Technical report, A24355*. – 2013. – 46 p. URL: <https://doi.org/10.15302/J-FEM-2017042>.

58 Goverde R.M.P. Railway timetable stability analysis using max-plus system theory / R.M.P.Goverde // *Transportation Research, Part B*. 2007. 41(2). P. 179-201.

59 Sahin H. New combinatorial approaches for solving railroad planning and scheduling problems: PhD thesis / Sahin Huvench. *Florida*, 2006. 145 p.

60 Hallowell, S.F. Optimal dispatching under uncertainty: with application to railroad scheduling : PhD thesis / S.F.Hallowell. University of Pennsylvania, 1993. 193 p.

61 Офіційний сайт Укрзалізниці: Показники вантажних перевезень. Розділ Транспорт» URL: <https://stat.gov.ua/uk/search?query=%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%8> (дата звернення: 14.04.2026).

62 Railway Performance. Official website of the company Network Rail. URL : <https://www.networkrail.co.uk/who-we-are/how-we-work/performance/railway-performance/> (дата звернення: 15.04.2026).

63 Office of Rail and Road. URL: <https://dataportal.orr.gov.uk/media/li5dwlkv/passenger-performance-jan-mar-2025.pdf/>

64 Our 2025 Train Delay Wrapped/ A year of European rail in numbers. Hop on board. URL : <https://chuuchuu.com/2025wrapped> (дата звернення: 15.04.2026)

- 65 Impacts of the COVID-19 crisis and national responses on European railway markets in 2025. *Independent Regulators` Group Rail*. 2025. P. 19-20.
- 66 SBB reaches record punctuality in passenger and improved in freight in 2025 URL: <https://railmarket.com/news/passenger-rail/49712-sbb-reaches-record-punctuality-in-passenger-and-improved-in-freight-in-2025#:~:text=SBB%20reports%20highest%20punctuality%20in,down%20from%2092.6%25%20in%202024.>
- 67 German long-distance rail sets new delay record. URL : <https://railmarket.com/news/passenger-rail/48175-german-long-distance-rail-sets-new-delay-record#:~:text=Karel%20Novak,network%20and%20extensive%20construction%20a>ctivity.
- 68 Офіційний сайт компанії PKP . URL : <https://www.plk-sa.pl/o-spolce/o-pkp-polskich-liniach-kolejowych-sa/raport-roczny>. (дата звернення 20.04.2026).
- 69 Укрзалізниця змогла забезпечити своєчасний рух поїздів, попри обстріли. URL : <https://biz.liga.net/all/transport/novosti/ukrzaliznitsya-smogla-obespechit-svoevremennoe-dvizhenie-poezdov-nesmotrya-na-obstrely> (дата звернення 20.04.2026).
- 70 Büker T. Stochastic modelling of delay propagation in large networks / T.Büker, B.Seybold // *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2012. №2.P. 34–50.
- 71 Berger, A. Stochastic Delay Prediction in Large Train Networks / A.Berger et al. // *11th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems, ATMOS*. 2011. 2011. vol. 20. P. 100–111.
- 72 Балака Є.І., Зоріна О.І., Писаревський І.М. Оцінка економічної доцільності інвестицій в інноваційні проекти на транспорті: навчальний посібник. Харків: УкрДАЗТ, 2005. 210 с.
- 73 Аналіз аварійності на транспорті України за 2020 рік. *Міністерство інфраструктури України*: веб-сайт.. URL: <https://mtu.gov.ua/files/bezpeka/Аналіз%20аварійності%20на%20транспорті%20України%20за%202020%20рік.pdf>. (Дата звернення 11.10.2024).

74 Engineering Safety Management (The Yellow Book). Volumes 1 and 2. Fundamentals and Guidance. Issue 4. London (United Kingdom, UK): Rail Safety and Standards Board on behalf of the UK rail industry, 2007. 361 P.

75 SAMRAIL. Acceptable Risk Level. SAMRAIL /DB / PM / WP2.4 / V1.0,2004. 53P.

АКТ

перевірки кваліфікаційної роботи магістра на наявність ознак академічного
плагіату

Відповідно до даних сервісу STRIKEPLAGIARISM праця
«Удосконалення графіку руху поїздів на основі моделі оперативного
коригування відхилень»,

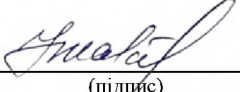
автор: Ніжегольцев Владислав Андрійович

(ПІБ автор повністю)

містить 0,43 % текстових збігів. Ознаки академічного плагіату – відсутні.

Перевірку виконала

доцент кафедри

управління експлуатаційною роботою  Олена МАЛАХОВА

(підпис)

15.06.2026 р.