

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Д. О. Гурін

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ РЕЗЕРВІВ ЧАСУ

В НИТКАХ ГРАФІКА РУХУ ПОЇЗДІВ

Монографія

Харків

УкрДУЗТ

2023

УДК 656.222.4

Г 95

*Рекомендовано вченою радою Українського державного
університету залізничного транспорту
(витяг з протоколу № 3 від 24.05.2023 р.)*

Рецензенти:

Ігор Володимирович Жуковицький, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електронних обчислювальних машин Українського державного університету науки і технологій

Микола Миколайович Мороз, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних технологій Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського

Гурін Д. О. Удосконалення методу визначення резервів часу в нитках графіка руху поїздів: Монографія. – Харків: УкрДУЗТ, 2023. – 92 с., рис. 29, табл. 18.

Г 95

ISBN

У монографії розглядаються актуальні питання організації експлуатаційної роботи на залізничному транспорті України в частині складання, виконання та аналізу графіку руху поїздів та застосуванню методу визначення резервів часу у графіку руху поїздів.

Призначено для наукових співробітників, викладачів закладів вищої освіти, аспірантів, студентів, які навчаються за спеціальністю «Транспортні технології (залізничний транспорт)».

УДК 656.222.4

ISBN

© Український державний університет залізничного транспорту, 2023.

ЗМІСТ

Список скорочень, що застосовуються в монографії	5
ПЕРЕДМОВА	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОПЕРАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ	8
1.1. Дослідження умов функціонування залізничного транспорту загального користування України	8
1.2. Аналіз надійності перевізного процесу в залізничній системі України	14
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАТРИМОК ПОЇЗДІВ НА ЗАЛІЗНИЧНІЙ ДІЛЬНИЦІ	19
2.1. Технологічні особливості завдання пошуку раціональних величин компенсаційного часу в нитках графіка поїздів різних категорій	19
2.2. Розроблення математичної моделі для моделювання процесу розповсюдження затримок поїздів на залізничній дільниці	21
2.3. Розроблення методу пошуку коефіцієнтів швидкості розповсюдження затримки математичної моделі	24
2.4. Розв'язання розробленої системи рівнянь SIR-моделі для моделювання процесу розповсюдження затримок поїздів на залізничній дільниці	30
2.5. Перевірка розробленої математичної моделі розповсюдження затримок поїздів на залізничній дільниці на адекватність	33
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАТРИМОК ПОЇЗДІВ У ЗАЛІЗНИЧНИХ МЕРЕЖАХ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕПІДЕМІОЛОГІЧНИХ SIR- МОДЕЛЕЙ	46

3.1. Просторове подання проблеми розповсюдження затримок поїздів у залізничній системі	46
3.2. Результати моделювання розповсюдження затримок поїздів на графі залізничного полігона	53
3.3. Визначення раціональних резервів часу в нитках графіка на основі статистичної гри	58
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ ВИМОГ ЩОДО ФОРМУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПІДСИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЗЕРВІВ ЧАСУ В НИТКАХ ГРАФІКА ТА ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	67
4.1. Дослідження функцій чинних автоматизованих систем АТ «Укрзалізниця» для розроблення вимог щодо формування автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу в графіку руху поїздів	67
4.2. Дослідження процедур планування та розроблення ниток графіка при наданні послуг з розкладом руху маршрутних поїздів і приватних локомотивів	72
4.3. Формування функцій і вимог щодо автоматизованої підсистеми визначення величин резервів часу в нитках графіка	75
ВИСНОВКИ	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	83

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ В МОНОГРАФІЇ

АРМ - автоматизоване робоче місце

АРМ ТРА - автоматизоване робоче місце інженера з ведення технічно-розпорядчих актів станцій

АСВВП - автоматизована система видачі та відміни попереджень на поїзди

АС Клієнт УЗ – система, розроблена з метою надання клієнту залізничного транспорту сервісу для оформлення перевезення вантажів згідно з діючими нормативними документами

АС МЕСПЛАН - автоматизована система документообігу замовлень на перевезення вантажів і формування планів

АСК ВП УЗ-Є - автоматизована система керування вантажними перевезеннями

АСК ПП УЗ - автоматизована система керування пасажирськими перевезеннями

ГА - генетичний алгоритм

ГЮЦ - головний інформаційно-обчислювальний центр

ГРП - графік руху поїздів

ДНЦ - поїзний диспетчер

СЦСГРП - система централізованого складання графіка руху поїздів

КПАР ГРП - комплекс програм автоматизованого розроблення графіка руху поїздів

ПП ГАС Railway - графоаналітичний редактор схем залізниць

РРМП - перевезення за розкладом руху маршрутних поїздів

РПЛ - рух вантажних поїздів з приватними локомотивами

СППР - система підтримки прийняття рішень

ПЕРЕДМОВА

Для залізничної системи України, що належить до мережних галузей з високими постійними витратами, одним із напрямів зменшення витрат на перевезення вантажів і пасажирів є підвищення точності руху поїздопотоків для отримання кращого рівня передбачуваності руху в системі. Цього можна досягти за рахунок забезпечення високого рівня системних властивостей надійності та стійкості нормативного графіка руху поїздів (ГРП).

Особливої актуальності впровадження операційної моделі з підвищення точності руху поїздопотоків набуває в умовах реалізації положень Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року, Постанови Кабінету Міністрів України «Про реалізацію пілотного проекту щодо допуску приватних локомотивів до роботи окремими маршрутами на залізничних коліях загального користування» і виконання зобов'язань України щодо лібералізації залізничного ринку згідно з Угодою про асоціацію між Україною, з одного боку, і Європейським Союзом, Європейським Співтовариством з атомної енергії та їхніми державами-членами, з іншого боку. У межах стратегії впровадження в Україні покращення швидкості та передбачуваності руху поїздів важливим є розроблення методів підвищення надійності графіка руху поїздів. Графік руху поїздів (ГРП) є одним з важливих нормативних планів, що визначає пунктуальність, надійність і характеризує ефективність роботи залізничної системи. Залізнична система України працює без встановленого графіка руху вантажних поїздів і має досить ненадійний рівень надання послуг з перевезення. За таких умов актуальним є закладання раціонального резерву часу в графік руху поїздів для дотримання точності та пунктуальності його виконання.

Чинні процедури складання графіка руху поїздів для залізничної мережі України не передбачають його дослідження на стійкість і надійність при різних варіантах затримок поїздів. Це призводить до збоїв в експлуатації, зменшення дільничної швидкості поїздів і неможливості зменшення впливу таких збоїв на загальну систему руху. Для можливості уникнення каскадів затримок поїздів важливо закладати у графік руху поїздів резерви часу, що є компенсаційним часом у нитці графіка для можливості прискорення руху поїзда та здійснення операції – нагін для введення поїзда, що запізнився, до графіка руху та зменшення впливу затримки на інші поїзди. Для виключення зазначених вище недоліків необхідним є удосконалення методів визначення резервів часу в нитках графіка на основі проведення автоматизованих розрахунків щодо прогнозування затримок поїздів у мережі з урахуванням закладених резервів часу та отриманих результатів корегувати нормативний ГРП до його введення в дію.

Матеріал монографії розраховано на здобувачів вищої освіти, аспірантів і наукових співробітників і фахівців, які працюють у галузі транспортних технологій, зокрема на залізничному транспорті. Матеріали монографії можуть бути використані при проведенні наукових досліджень та організації навчального процесу в закладах вищої освіти.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОПЕРАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ

1.1. Дослідження умов функціонування залізничного транспорту загального користування України

На сьогодні залізнична галузь України знаходиться в процесі реформування, що проводиться з метою підвищення ефективності діяльності галузі відповідно до положень Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року [1], виконання зобов'язань щодо Угоди про асоціацію між Україною, з одного боку, і Європейським Союзом, Європейським Співтовариством з атомної енергії та їхніми державами-членами, з іншого боку (далі Угода про асоціацію), зокрема статті 368 та Додатка XXXII Угоди про асоціацію [2] і планів її імплементації [3]. За стратегією [1], одним із завдань, у напрямі якого реалізується реформа АТ «Укрзалізниця», є запровадження вертикально-інтегрованої системи керування з належним стратегічним плануванням ресурсів і забезпечення відокремлення оператора інфраструктури від вантажних і пасажирських перевізників.

При дослідженні умов функціонування залізничної системи України важливо враховувати значні зміни у 2014 році, коли відбулася військова агресія Російської Федерації, окупація Кримського півострова та активні військові дії на території України, що продовжуються. Після цих подій виникли транспортна блокада держави Україна, втрата частини залізничної мережі та значної частки обсягів перевезень, зміна просторового напрямлення вагонопотоків. Однак з 2015 року позитивна динаміка розвитку економічних відносин з ЄС та іншими країнами світу дала змогу Україні перебудувати власну схему напрямлення вагонопотоків і адаптуватись до існуючих умов. Отже, репрезентативним періодом, що

характеризує однакові умови функціонування залізничної системи порівняно з 2019 роком, є 2015-2018 роки. У цьому періоді реалізується структурна реформа залізничної галузі, а основним прибутковим видом діяльності АТ «Укрзалізниця» є вантажні перевезення. Із загальних 82,4 млрд грн доходів за 2019 рік від вантажних перевезень надійшло 72,5 млрд грн [9]. Пасажирські перевезення були й залишаються збитковими. За 2019 рік збитки склали близько 12,8 млрд грн, у т. ч. у приміському сполученні – 6,55 млрд грн [9].

На ринку вантажних перевезень у 2015-2020 роках спостерігався загальний тренд зростання кількісних показників – обсягів перевезених вантажів і вантажообігу [11], однак обмеження, пов'язані з COVID-19, призвели до падіння обсягів перевезень, особливо в пасажирському секторі. Однак у вантажних перевезеннях залізничний транспорт конкурує з іншими видами транспорту.

Одним із важливих показників конкурентоспроможності залізничного транспорту є показник середньої відстані перевезення 1 т вантажу. На рисунку 1.1 подано діаграму середньої відстані перевезення 1 т вантажів окремими видами транспорту у 2021 році. В одній ніші знаходяться залізничний і річковий транспорт – відповідно 581 та 406 км, що загострює конкуренцію, особливо за умови меншої вартості перевезення річковим транспортом. Однак головним недоліком річкового транспорту є значно більші витрати часу на перевезення, ніж у залізничного, і залежність від погодних умов, що збільшує непередбачуваність перевезення вантажу. Крім того, річковий транспорт має сезонні обмеження – судноплавство обмежується в зимовий період.

Після 2014 року та окупації частини промислових районів Донбасу змінюється структура вантажопотоків у залізничній системі. Перевезення вантажів залізничним транспортом загального користування з розподілом за видами вантажу в період 2017-2021 років наведено на рисунку 1.2.

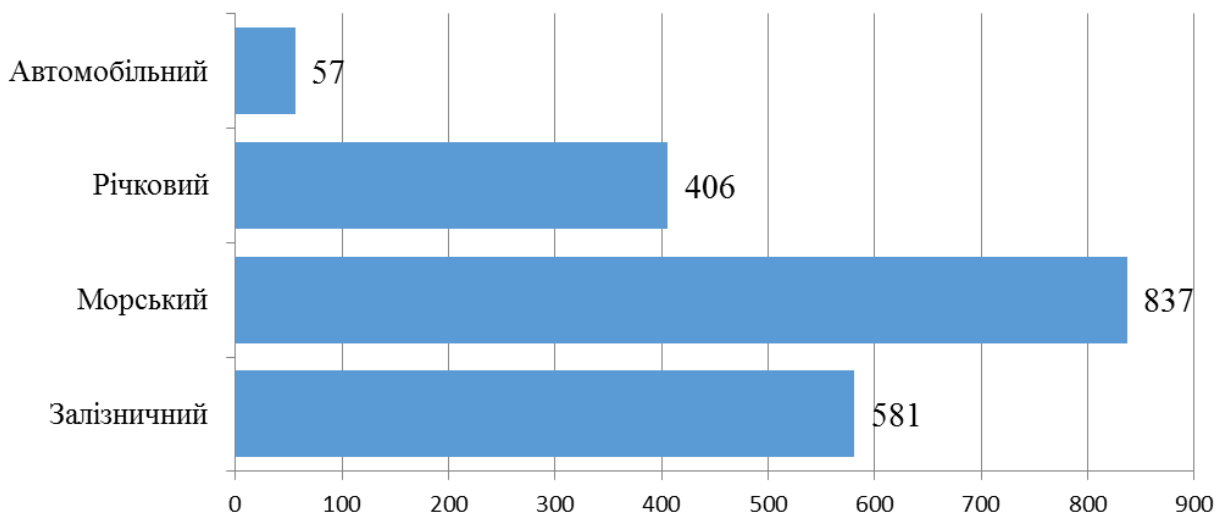


Рисунок 1.1 – Середня відстань перевезення, км, 1 т вантажів окремими видами транспорту у 2021 році

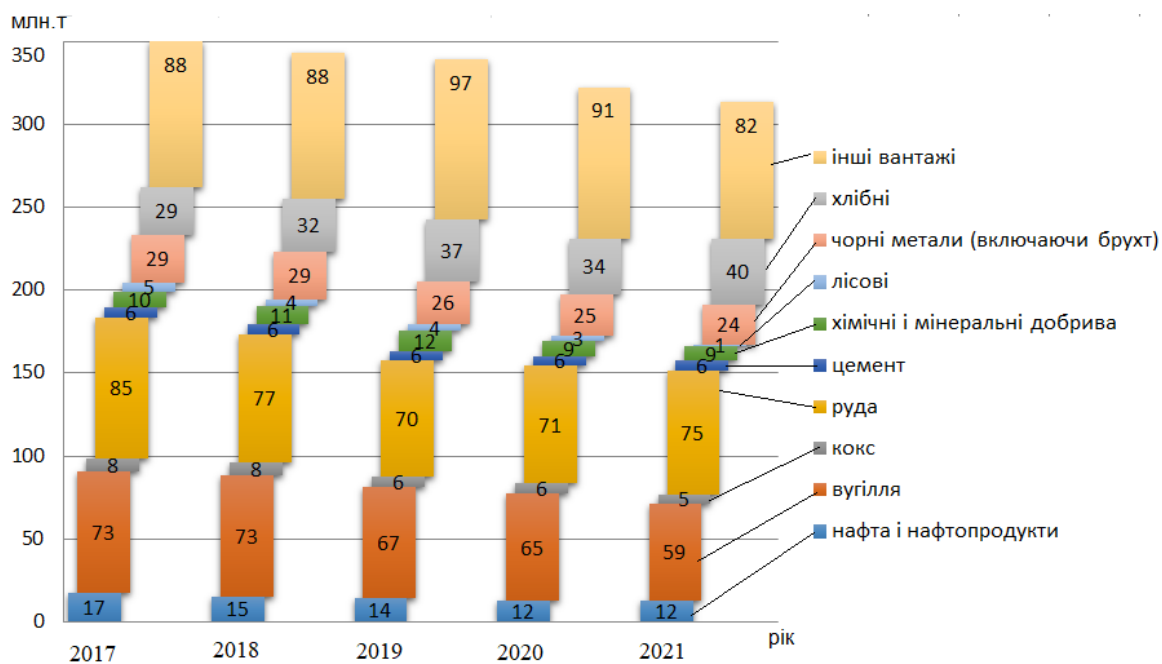


Рисунок 1.2 – Перевезення вантажів залізничним транспортом загального користування з розподілом за видами вантажу в період 2017-2021 років (%)

Частка масових вантажів у загальних обсягах перевезення вантажів зменшується. Так, у 2021 році порівняно з 2017 роком відсоток вугілля

зменшився на 14 %, руди – на 10 %, коксу – на 3 %. Високомаржинальні вантажі, особливо аграрна продукція (хлібні), збільшилися у 2021 році на 11 % порівняно з 2017 роком. Інші вантажі, до яких можуть належати вантажі третього класу, зменшилися лише на 6 %.

Автомобільний транспорт є дорожчим, але має конкурентні переваги за вартістю на відстані до 300 км і вищу швидкість перевезень, а в умовах дефіциту рухомого складу в залізничній системі може конкурувати на маршрутах і відстанях близько 500 км. Для забезпечення стабільності розвитку залізничного транспорту на ринку перевезень стає важливо підвищити точність руху поїздопотоків для отримання кращого рівня передбачуваності руху в системі.

За розподілом загального експлуатаційного вантажообігу бруто у 2021 році між пасажирським і вантажним рухом залізнична система України є переважно вантажною – 88 % загального вантажообігу (рисунок 1.3). Отже, важливо провести аналіз залізничних вантажних перевезень для виявлення недоліків технології перевізного процесу.

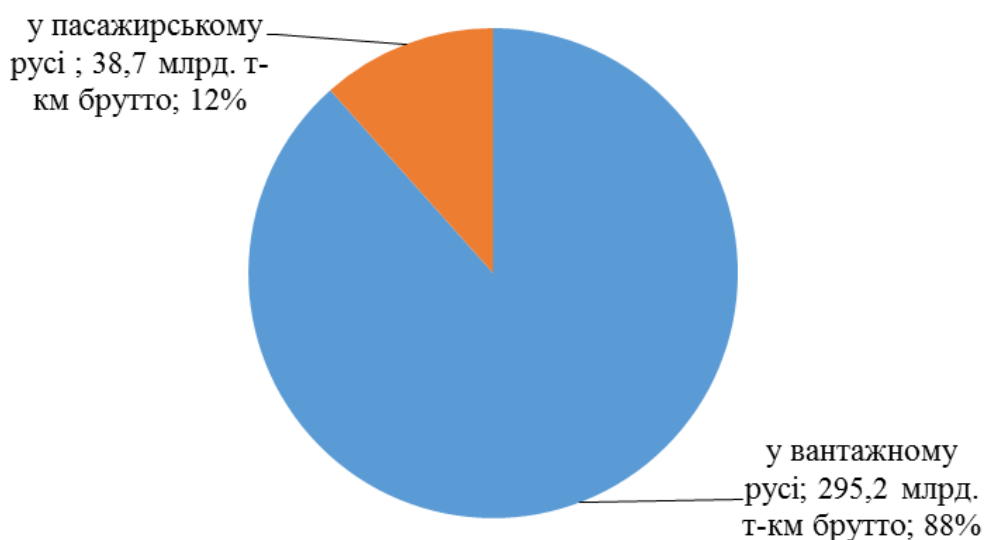


Рисунок 1.3 – Розподіл часток загального експлуатаційного вантажообігу бруто, млрд ткм бруто, між пасажирським і вантажним рухом у 2021 році

Проведений аналіз виявив тенденцію збільшення тривалості знаходження вантажних вагонів у русі та падіння кількісних показників на тлі скорочення прибутків, що свідчить про значні проблеми залізничного транспорту і втрату конкурентоспроможності. На ринку перевезень для вантажовідправника важливим стає фактор точності часу переміщення. Саме тому впровадження технологій перевезень на основі структурованості залізничних операцій [14] - підвищення точності руху поїздопотоків – дасть змогу підвищити рівень передбачуваності руху і, як наслідок, змінити негативну динаміку якості операційної роботи залізниці.

Система організації перевезень вантажів передбачає прив'язку плану формування поїздів до нормативного графіка руху поїздів. Однак, враховуючи необхідність накопичення на сортувальних станціях нормативно заданої кількості вагонів у поїзді та його маси (у середньому поїзд складається з 45-55 вагонів з масою 4500-5000 т), застосовується принцип відправлення поїздів «за готовністю», тобто після проведення всіх операцій з поїздом його відправляють без дотримання розкладу руху. Це спричиняє недотримання графіка руху поїздів, а тому на мережі АТ «Укрзалізниця» за розкладом прямують лише пасажирські поїзди.

Аналіз змін операційних моделей залізниць світу доводить, що залізнична галузь перестає бути монопольним середовищем, зростає потреба в персоналізованій мобільності та логістичних рішеннях, що забезпечує менші ризики в перевізному процесі [15]. У досить різних залізничних системах Північної Америки, Європи, Австралії тощо спостерігається єдиний тренд зміни операційної моделі, що ґрунтується на підвищенні точності та надійності руху поїздопотоків. Крім того, у межах запланованого [3-7] вертикального розділення АТ «Укрзалізниця» виникає необхідність кращої координації та дотримання наданого компаніям-перевізникам графіка руху поїздів. Такий підхід потребує планування операцій у часі і просторі з можливістю закладення резервів часу для їхнього реалістичного виконання на кожен день.

У таких умовах усе більшої важливості в практиці експлуатації залізничних систем набуває нормативний документ – графік руху поїздів (ГРП) [16], що є планом розподілу часу прямування потрібної кількості поїздів різних категорій через залізничну мережу. ГРП для кожного поїзда визначає план послідовного розподілу часу проходження за ділянками маршруту – нитка графіка руху поїздів (далі нитка) – частка пропускної спроможності інфраструктури, необхідна для забезпечення руху за маршрутом одного поїзда між пунктами відправлення і призначення протягом визначеного проміжку часу [8].

В умовах впровадження цифровізації, автоматизації та IoT [17-19] з'являються нові можливості для використання графіка руху поїздів як поєднувального елемента плану перевезень від заявки до запланованого навантаження, руху поїзда, ув'язки його прибуття з планом формування поїздів на опорних станціях мережі. Нитка графіка руху в умовах автоматизації перетворилась на цифрову модель для бронювання місць у составі поїзда з закладеним часом переформувань на станціях і прибуттям вантажної відправки на станцію вивантаження. Графік руху стає інтегрованим у межах спеціально створених цифрових платформ складання ГРП з ув'язкою з автоматизованих систем добового планування сортувальних станцій і диспетчеризації. Такий підхід відрізняється від старих концепцій експлуатації залізничних систем, започаткованих у 1960-х роках минулого століття, при яких відсутня точність, відправлення поїздів відбувається «за готовністю», план формування поїздів і графік руху не враховують особливостей щоденних операцій, а оперативне планування засноване лише на макроконтролі перевізного процесу за встановленими точками (стиками) на залізничній мережі на звітну годину доби.

У нових умовах графік руху поїздів є сітьовим технологічним документом, що визначає основні нормативи технологічного процесу перевезень, який не просто відсторонено відображує нераціональну і

суб'єктивну схему направлення поїздопотоків, а пристосовує попит і пропозицію. Це дає змогу підвищити надійність перевезень у залізничних системах, підвищити провізну та пропускну спроможність мережі, зменшити експлуатаційні витрати без додаткових капітальних вкладень в інфраструктуру та рухомий склад.

Ураховуючи важливу особливість залізничної системи України, що працює без встановленого графіка руху вантажних поїздів, у цьому дослідженні запропоновано провести аналіз надійності перевізного процесу.

1.2. Аналіз надійності перевізного процесу в залізничній системі України

Одним із показників, що характеризує властивість безвідмовності перевізного процесу в залізничній системі, є кількість і тривалість затримок поїздів. На рисунку 1.4 наведено паралельну динаміку кількості та тривалості затримок у мережі з експлуатаційним вантажообігом, що характеризує навантаження на залізничну мережу за період 2009-2021 років [11].

Згідно з проведеним аналізом кількість затримок у 2021 році збільшилась у 4,6 раза порівняно з 2017 роком. Це свідчить про значні проблеми в перевізному процесі протягом декількох останніх років. За детальною довідкою про затримку поїздів по станціях дирекції регіональної філії «Південна залізниця» більше 12 год, за період звітних дат з 01.09.2021 по 31.01.2022 рік були отримані дані про кількість і тривалість простою «кинутих» поїздів (рисунок 1.5).

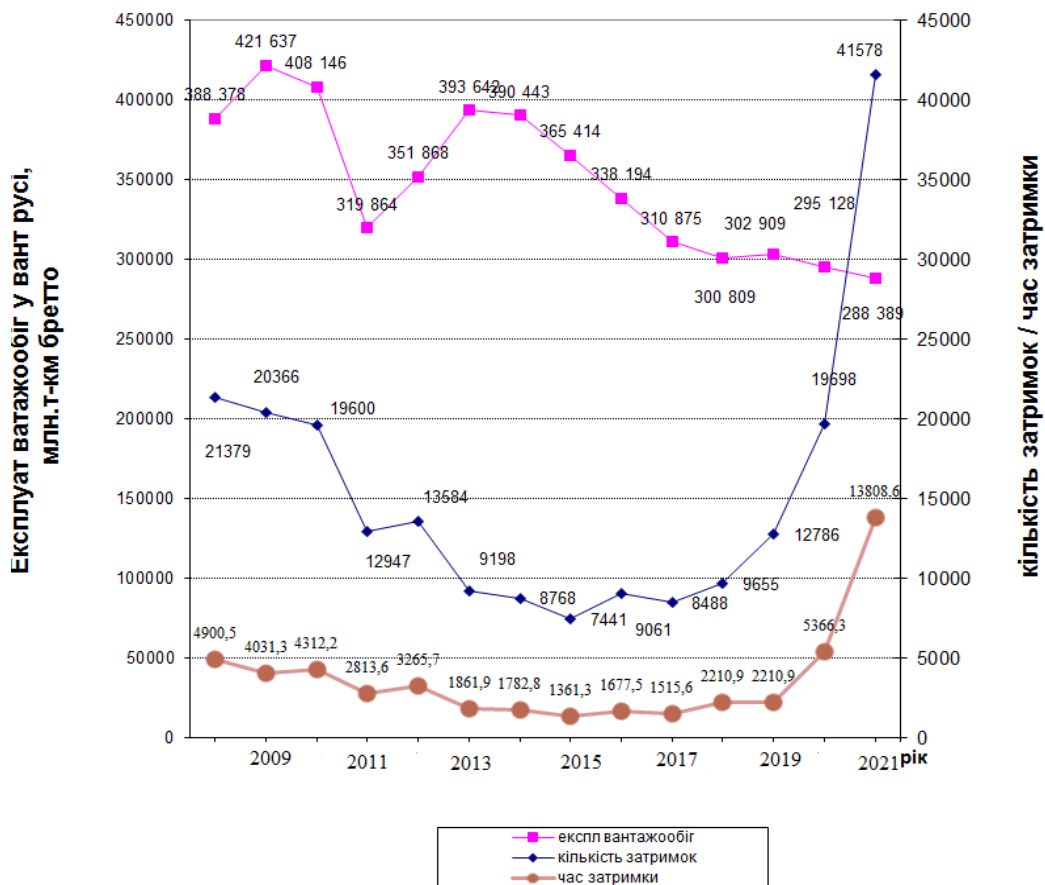


Рисунок 1.4 – Діаграма залежності експлуатаційного вантажообігу у вантажному русі від розподілу кількості та тривалості затримок поїздів біля вхідних світлофорів на залізниці України за період 2009-2021 років

Аналіз причин «кидання» (рисунок 1.5, а, б) показав, що протягом шести місяців 1597 поїздів було зупинено і залишено без локомотива, з яких 160 поїздів були зупинені лише з причини неприймання сусідньою регіональною філією, тобто через відсутність узгодженого графіка руху між філіями єдиної залізничної мережі. Простій 160 «кинутих» поїздів сумарно склав близько 13 тис. год, що завдало залізниці колосальних збитків. На рисунку 1.6 наведено діаграму середнього простою «кинутих» поїздів з поділом за причинами. Середній простій «кинутого» поїзда досягав 270,6 год, тобто 11,3 доби, що є неприпустимим для надійної роботи залізничного транспорту.

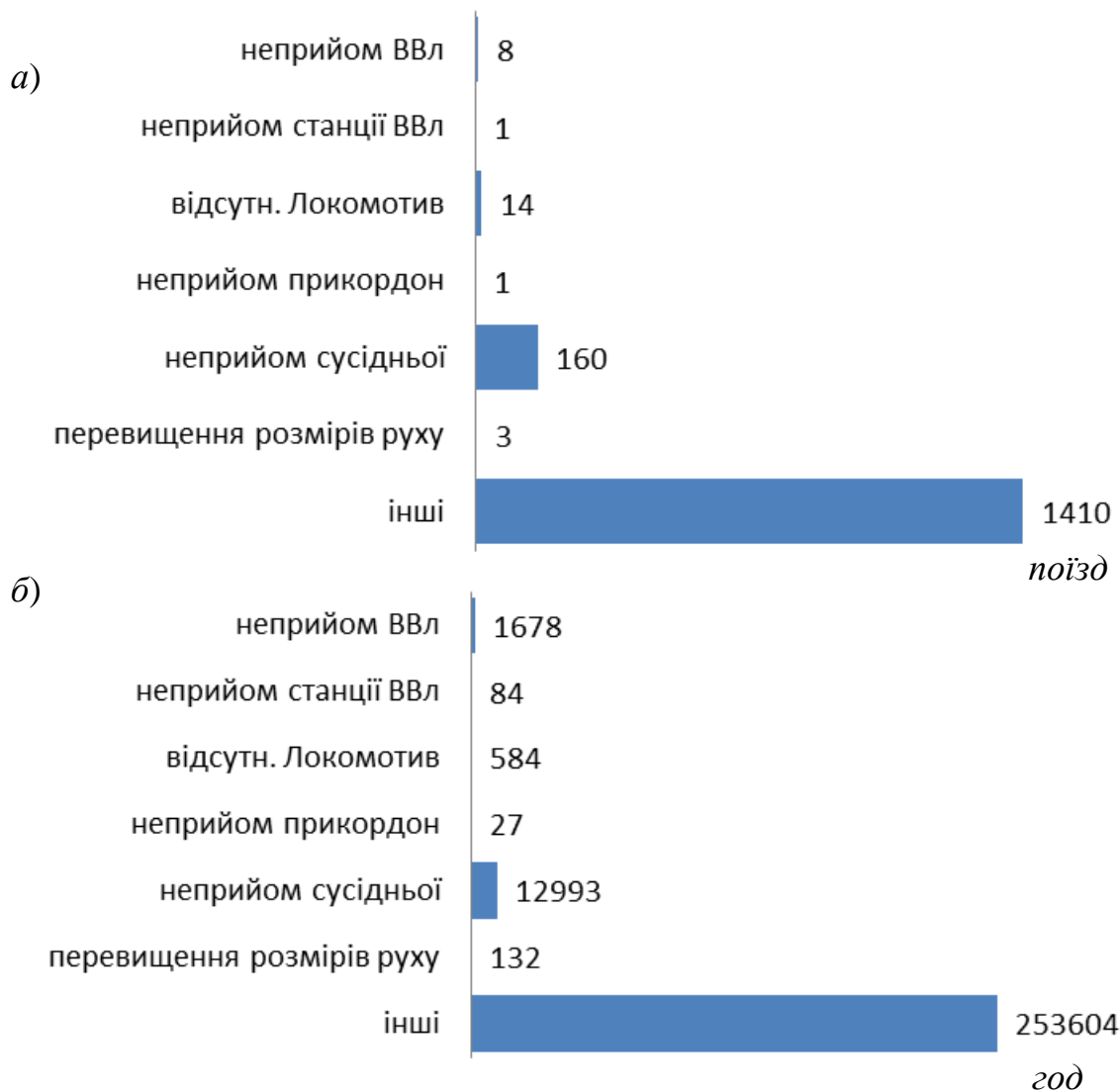


Рисунок 1.5 – Діаграма аналізу причин «кинутих» поїздів на станціях дирекцій регіональної філії «Південна залізниця» більше 12 год:
а –кількість «кинутих» поїздів; *б* – тривалість «кинутих» поїздів

Аналіз рівня виконання нормативного графіка руху поїздів на мережі АТ «Укрзалізниця» свідчить про досить високі показники точності (рисунок 1.7).

Виявлено, що затримки в мережі згубно впливають на терміни доставки вантажів, зокрема у грудні 2021 року в середньому за добу порушувалась доставка 43,3 вантажної відправки. Це свідчить про значні проблеми в системі планування руху поїздопотоків і відсутність достатнього рівня надійності ГРП.

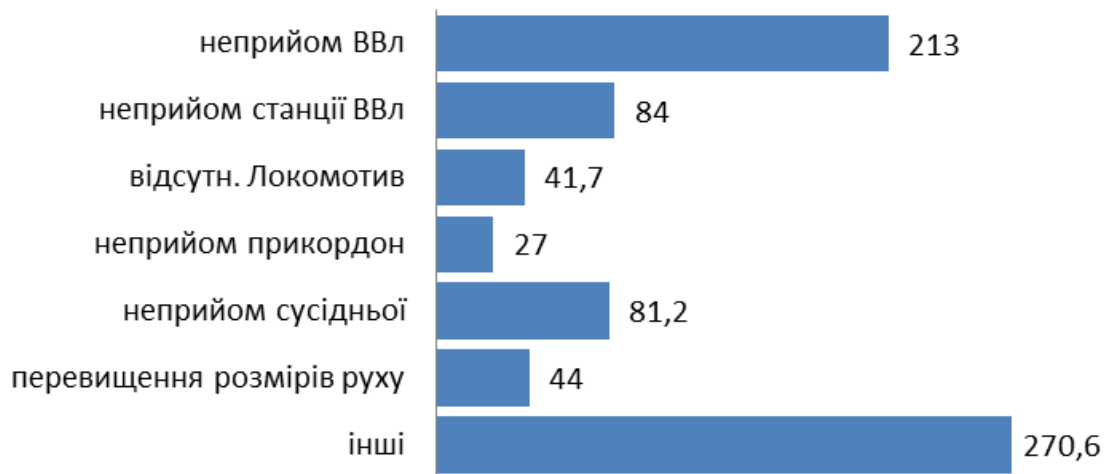


Рисунок 1.6 – Діаграма середнього простою «кинутих» поїздів, год, з поділом за причинами на станціях дирекцій регіональної філії «Південна залізниця» більше 12 год за період звітних дат з 01.09.2019 по 31.01.2020 рік

Графік відправлення вантажних поїздів на мережі філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця» у 2019 році склав 96,3 %, пасажирських – 99,2 %, приміських – 99,1 %. Рівень виконання графіка руху досить високий, що може свідчити про не зовсім якісну систему обліку виконання графіка руху. Про це свідчить показник «порушення термінів доставки вантажних відправок», що в залізничній системі України достатньо високий і складає 15792 порушення, тобто в середньому за добу порушувалась доставка в 43,3 відправки (рисунок 1.8).

Відсутність надійності руху поїздопотоків призводить до значних збитків для АТ «Укрзалізниця».

Залізнична система України працює без встановленого графіка руху вантажних поїздів і має досить ненадійний рівень надання послуг з перевезення. За таких умов актуальним є закладання раціонального резерву часу в графік руху поїздів для дотримання точності та пунктуальності його виконання.



Рисунок 1.7 – Діаграма розподілу рівня виконання нормативного графіка руху поїздів різних категорій за 2021 рік

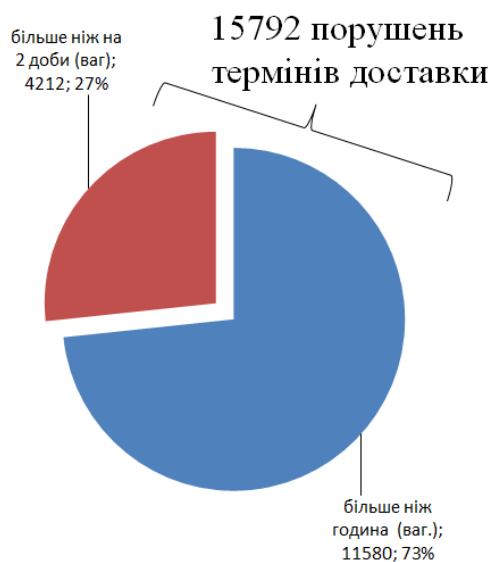


Рисунок 1.8 – Діаграма розподілу порушення термінів доставки за грудень 2021 року на мережі АТ «Укрзалізниця»

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАТРИМОК ПОЇЗДІВ НА ЗАЛІЗНИЧНІЙ ДІЛЬНИЦІ

2.1. Технологічні особливості завдання пошуку раціональних величин компенсаційного часу в нитках графіка поїздів різних категорій

Для залізничних систем без дотримання графіка руху вантажних поїздів, до яких належить залізниця України, правила встановлення резервів часу в нитці поїздів різних категорій є досить загальними, що потребує проведення досліджень впливу поїздів різних категорій і величини їхнього резерву часу на надійність графіка руху на дільниці [20]. Встановлено, що найбільш невивченим є час для відновлення в нитці, розподілений за способом компенсації під час руху (англ. running time supplements) [21]. Компенсація під час руху полягає у використанні різниці між мінімальним часом прямування поїзда по дільниці та часом, запланованим розкладом, і містить складову – час регулярної добавки, що додається до часу прямування поїзда по кожній дільниці відповідно до вимог оператора інфраструктури. Величина добавки (резерв часу) у різних залізничних системах є різною залежно від дальності прямування поїзда, часу прямування та стоянки на станціях. Цей резерв часу у випадку запізнення поїзда дає змогу виконати операцію нагону – прискорення ходу поїзда порівняно з передбаченим плановим розкладом - для скорочення запізнення та уникнення сценаріїв каскадних затримок із значними витратами. На рисунку 2.1 наведено один із можливих практичних прикладів застосування операції нагону при виникненні первинної затримки у графіку руху поїздів на умовній двоколійній дільниці А-Б.

За відправленням зі станції Б у вантажного поїзда № 2002 виникла первинна затримка тривалістю $t_{\text{delay}} = 14$ хв, при якій існує два сценарії розвитку подій. Запізнення передбачає розвиток другого сценарію, за яким неминучим є зупинка поїзда № 2002 на станції ж для виконання операції обгону (з простоєм 24 хв) пасажирських поїздів, що прямують пачкою за нормативним розкладом з вищим пріоритетом.

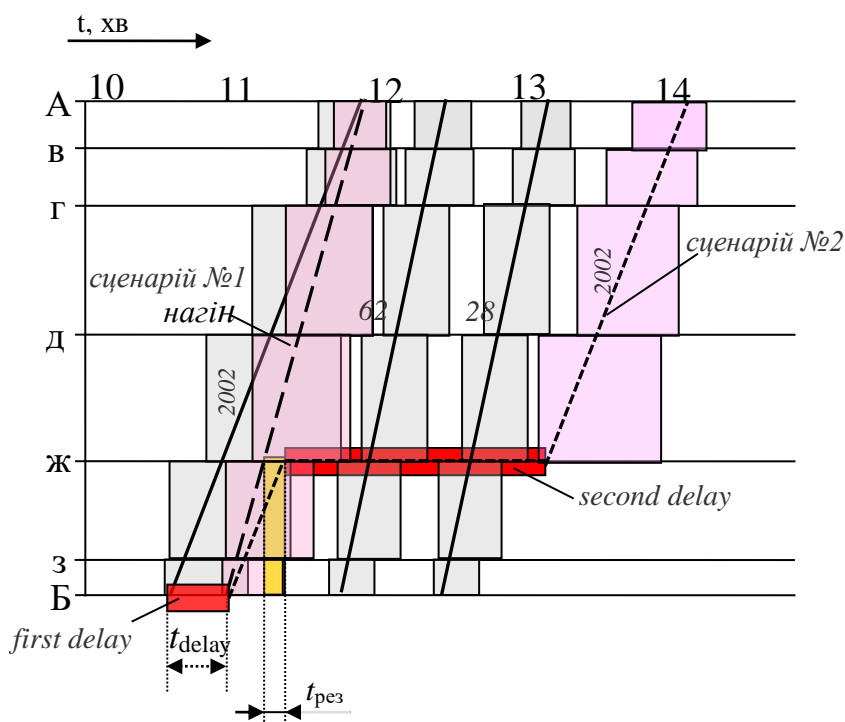


Рисунок 2.1 – Схема сценаріїв руху поїздів при виникненні затримки на двоколійній дільниці: сценарій 1 – реалізація операції нагону; сценарій 2 – виконання операції обгону з пасажирськими поїздами

У випадку існування резерву часу (компенсації під час руху) розвиток подій може змінитись на сценарій 1, що передбачає передачу наказу від диспетчера машиністу вантажного поїзда № 2002 для можливості прискорення останнього на першому перегоні Б-з на 2 хв, на другому з-ж - 4 хв; третьому перегоні ж-д - 5 хв; четвертому перегоні д-г - 5 хв; на перегоні г-в - 4 хв, що дасть змогу вантажному поїзду № 2002 прибути на

станцію А за нормативним розкладом руху поїздів. Один із прикладів розвитку сценаріїв у практичних умовах реалізації графіка руху доводить ефективність існування резерву у вигляді компенсаційного часу в нитці графіка. Однак при виборі занадто великого резервного часу збільшується тривалість зайняття поїздом інфраструктури дільниці, що призводить до зменшення дільничної швидкості руху та пропускної спроможності дільниці. За таких умов важливим є вирішення завдання пошуку раціональних величин компенсаційного часу в нитках графіка поїздів різних категорій. Це дасть змогу знайти баланс між надійністю графіка руху та практичною пропускною спроможністю залізничної дільниці [22, 23].

2.2. Розроблення математичної моделі для моделювання процесу розповсюдження затримок поїздів на залізничній дільниці

Для розв'язання задачі пошуку раціональних величин компенсаційного часу в нитках графіка поїздів різних категорій запропоновано застосувати SIR-модель (Susceptible–Infected–Removed model), використовувану для моделювання розповсюдження інфекційних захворювань у замкненому суспільстві, розповсюдження вірусів у комп'ютерній мережі та випадків спланованого впливу на агента в соціальних мережах [24, 25]. Адаптуючи цю модель до задачі впливу величини затримок поїздів на залізничній мережі, можна подати процес розповсюдження інфекційних хвороб як процес розповсюдження затримки поїздів і пов'язаного впливу на рух поїздів на залізничній мережі. У межах прийнятої постановки задачі для опису впливу резерву часу в нитці графіка поїздів різних категорій у роботі запропоновано загальну кількість поїздів на розрахунковій дільниці подати в трьох станах, причому кожний з них являє собою визначний етап при розвитку розповсюдження затримки.

Отже, загальну кількість ниток поїздів (вантажні та пасажирські) слід поділити умовно на групи: чутливі до затримки поїзди, що в момент часу прямують за графіком, але потенційно можуть бути затримані при русі на дільниці (англ. Susceptible); поїзди, що прямують із затримкою та впливають на прямування інших поїздів, передаючи їм затримку (англ. Infected); поїзди, що за час прямування через залізничну дільницю з затримкою усунули її (виконали нагін), прямують за графіком і не впливають на виникнення затримок у подальшому русі (англ. Removed) [26-29]. На рисунку 2.2 наведено граф процесу переходу поїздів між станами на дільниці.

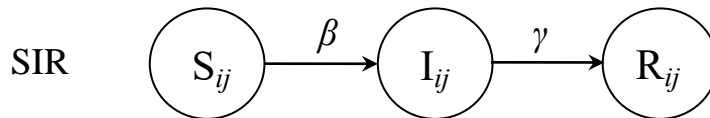


Рисунок 2.2 – Граф процесу переходу поїздів між станами на дільниці

Ураховуючи важливість обліку різної пріоритетності руху на дільниці поїздів різних категорій запропоновано розширити групи станів на підгрупи-класи відповідно до їхньої категорії r . Для змішаної моделі експлуатації дільниці в дослідженні запропоновано врахувати такі категорії поїздів: $r=1$ – пасажирські поїзди; $r=2$ – приміські поїзди; $r=3$ – вантажні поїзди. За діючими правилами [30, 31], ієрархія пріоритетності відповідає зазначеній їхній послідовності категорій. Зроблено припущення, що поїзди кожного класу мають однакові характеристики процесів передачі затримки та відновлення руху.

За роботою [32], математичну модель можна записати як систему диференціальних рівнянь вигляду

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS^r(t)}{dt} = -\sum_l \beta^{r,l} S^r(t) I^l(t); \\ \frac{dI^r(t)}{dt} = \sum_l \beta^{r,l} S^r(t) I^l(t) - \gamma^r I^r; \\ \frac{dR^r(t)}{dt} = -\gamma^r I^r, \end{array} \right. \quad (2.1)$$

У явному вигляді математичну SIR-модель для трьох категорій поїздів: $r=1$ – пасажирські поїзди; $r=2$ – приміські поїзди; $r=3$ – вантажні поїзди, записано нижче [26]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS^{r=1}(t)}{dt} = -(\beta^{1,1} S^1(t) I^1(t) + \beta^{1,2} S^1(t) I^2(t) + \beta^{1,3} S^1(t) I^3(t)); \\ \frac{dS^{r=2}(t)}{dt} = -(\beta^{2,1} S^2(t) I^1(t) + \beta^{2,2} S^2(t) I^2(t) + \beta^{2,3} S^2(t) I^3(t)); \\ \frac{dS^{r=3}(t)}{dt} = -(\beta^{3,1} S^3(t) I^1(t) + \beta^{3,2} S^3(t) I^2(t) + \beta^{3,3} S^3(t) I^3(t)); \\ \frac{dI^{r=1}(t)}{dt} = \beta^{1,1} S^1(t) I^1(t) + \beta^{1,2} S^1(t) I^2(t) + \beta^{1,3} S^1(t) I^3(t) - r^1 I^1; \\ \frac{dI^{r=2}(t)}{dt} = \beta^{2,1} S^2(t) I^1(t) + \beta^{2,2} S^2(t) I^2(t) + \beta^{2,3} S^2(t) I^3(t) - r^2 I^2; \\ \frac{dI^{r=3}(t)}{dt} = \beta^{3,1} S^3(t) I^1(t) + \beta^{3,2} S^3(t) I^2(t) + \beta^{3,3} S^3(t) I^3(t) - r^3 I^3; \\ \frac{dR^{r=1}(t)}{dt} = -\gamma^1 I^1, \\ \frac{dR^{r=2}(t)}{dt} = -\gamma^2 I^2; \\ \frac{dR^{r=3}(t)}{dt} = -\gamma^3 I^3. \end{array} \right.$$

де S^r – кількість сприятливих поїздів у класі r на дільниці, поїзд;

$\beta^{r,l}$ – швидкість розповсюдження затримки від поїздів класу r до поїздів класу l на дільниці, год⁻¹ ($r=l, r, l \in R$);

I^l – кількість інфікованих поїздів класу l на дільниці, поїзд; R^r – кількість поїздів класу r , що прямували з затримкою, але усунули її, поїзд;
 γ^r – швидкість відновлення затримки в поїздів класу r на дільниці;
 t – час або крок моделювання, год.

Усі параметри системи мають додатні значення.

Система рівнянь має умову нормування вигляду $N^r = S^r(t) + I^r(t) + R^r$, де N^r – загальна кількість поїздів класу r на дільниці, $N = \sum_r N^r$, N – загальна кількість поїздів усіх класів на дільниці.

Початкові умови для системи (2.1) рівні $(S_0^r, I_0^r, 0)$, де S_0^r, I_0^r – кількість сприятливих і затриманих поїздів у класі r на дільниці при $t = 0$ відповідно.

Важливими параметрами системи (2.1) є швидкість розповсюдження затримки від поїздів $\beta^{r,l}$ і швидкість відновлення затримки в поїздів класу r на дільниці γ^r . У роботі запропоновано провести дослідження за такою послідовністю: спочатку розробити метод для пошуку параметрів $\beta^{r,l}$ на реальних даних затримок реальної дільниці, а після провести моделювання розповсюдження затримки з різними швидкостями відновлення затримки.

2.3. Розроблення методу пошуку коефіцієнтів швидкості розповсюдження затримки математичної моделі

Для пошуку параметрів швидкості розповсюдження затримки в системі диференціальних рівнянь (2.1) у роботі запропоновано використати метод еволюційних обчислень, зокрема генетичний алгоритм (ГА) [33-35]. У загальному вигляді задачу пошуку параметрів $\beta^{r,l}$ можна подати як задачу оптимізації вигляду

$$\begin{aligned}
F(\beta) &\rightarrow \min \\
g(\beta) &= 0, \\
h(\beta) &\leq 0, \beta \in \mathfrak{R}^n,
\end{aligned}
\tag{2.2}$$

де F – цільова функція, що оцінює різницю значень між емпіричними значеннями кількості інфікованих (затриманих) поїздів I^r і модельними I_m^r , отриманими при розв’язанні системи диференціальних рівнянь (1) з урахуванням заданих початкових умов, що відповідають реальним [36];

$$g(\beta) = 0;$$

$h(\beta) \leq 0$ – обмеження рівності та нерівності відповідно, що відповідають постановці задачі розв’язання системи (2.1).

У межах розв’язання оптимізаційної задачі (2.2) в системі (2.1) параметри $\gamma^r = 0$.

Для реалізації оптимізаційної задачі (2.1) у межах генетичного алгоритму змінні моделі подано у формі хромосоми фіксованої довжини з урахуванням обмежень на їхні діапазони і зведенням їх в один числовий вектор

$$C^h = (\beta^{1,1}, \beta^{1,2}, \beta^{1,3}, \beta^{r,l}, \dots, \beta^{3,3}), \tag{2.3}$$

де $h = \overline{1, K}$ – номер хромосоми C , $\beta^{r,l} \in \{3 \times 3\}$ або $C^h = [1 \times 9]$, а змінна має обмеження $0 \leq \beta^{r,l} < 1$.

Розв’язання системи диференціальних рівнянь (2.1) у межах фітнес-функції ГА запропоновано виконати чисельним методом Рунге-Кутта четвертого порядку [37, 38]. Критерієм оцінювання підбору змінних в

оптимізаційній задачі (2.2) застосовано середню абсолютну похибку (MAPE) між емпіричними та модельними результатами [39, 40]

$$F(\beta) = \frac{1}{M} \sum_{M,r} \frac{|I^r(t) - I_m^r(t)|}{I_m^r(t)} \cdot 100\% \rightarrow \min \quad (2.4)$$

де показник $F(\beta)$ не визначений для нульових значень $I_m^r(t)$;

M – кількість рядків векторів експериментальних даних вибірки $\langle \bar{X}_q, \bar{Y}_q \rangle$, $q = \overline{1, M}$;

$I^r(t)$ – вихідний вектор вибірки $\langle \bar{X}_q, \bar{Y}_q \rangle$, $I^r(t) \in \bar{Y}_q$;

$I_m^r(t)$ – результат розв'язання системи диференціальних рівнянь (2.1) при початкових умовах $(S_0^r, I_0^r, 0)$, що відповідають q -му рядку вибірки $\langle \bar{X}_q, \bar{Y}_q \rangle$, $(S_0^r, I_0^r, 0) \in \bar{X}_q$.

2.3.1. Оброблення експериментальних даних і підбирання параметрів швидкості розповсюдження затримки математичної моделі SIR

Для можливості отримання точних даних щодо поширення кількості затриманих поїздів у часі на розрахунковій залізничній дільниці з урахуванням впливу різних категорій поїздів у роботі був розроблений спеціальний алгоритм отримання даних. Для генерування затримок поїздів різних категорій і їхнє поширення в графіку руху в роботі використана оптимізаційна математична модель [41]. Згідно до розробленої процедури виконано моделювання поширення затримки поїздів у робочому графіку руху років на залізничній лінії Л–С регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця» [20].

В експериментальних дослідженнях було розроблено три сценарії, за якими моделювалась затримка одного поїзда з прийнятого класу r з незмінними параметрами інфраструктури та нормативного графіка руху. Затримка модулювалась у непарному напрямку руху за відправленням зі станції Л з величиною 25,17 хв відповідно до досліджень [41]. Початкові умови при $t = 0$ для моделювання поїздів $N^{r=1} = 9$ поїздів, $N^{r=2} = 4$ поїзди, $N^{r=3} = 32$ поїзди. Візуалізація графіків залежностей кількості затриманих поїздів різних класів з наростаючим підсумком від моменту виникнення модельної затримки пасажирського поїзда наведено на рисунку 2.3.

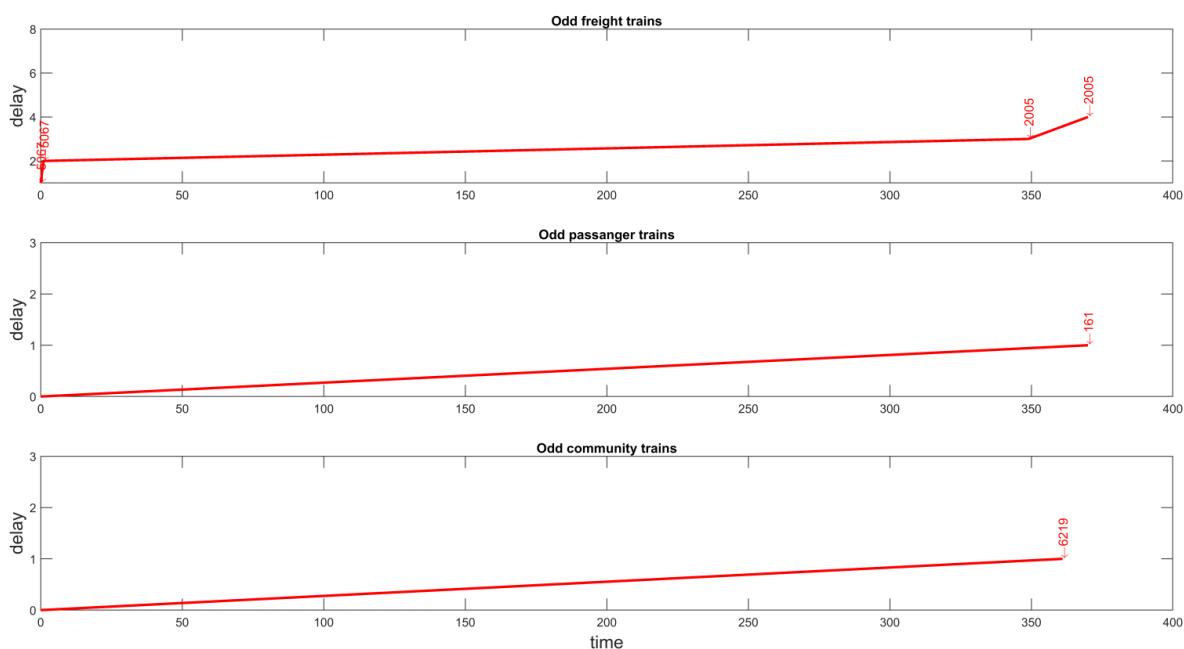


Рисунок 2.3 – Залежність кількості затриманих поїздів різних класів з наростаючим підсумком від моменту модельної затримки пасажирського поїзда № 161 у непарному напрямку руху на дільниці Л – С

При затримці одного приміського поїзда наслідки набагато менші порівняно з затримкою пасажирського поїзда, що має вищий пріоритет (рисунок 2.4).

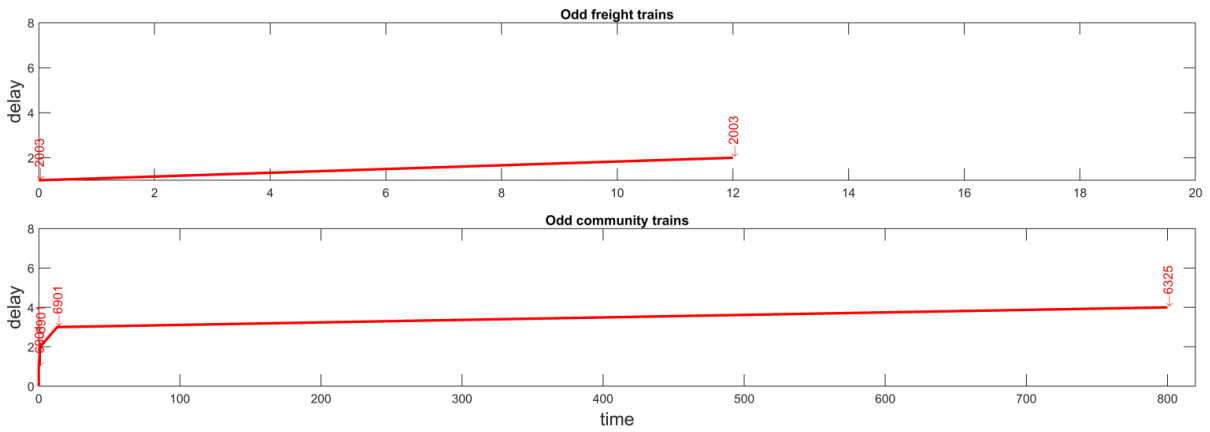


Рисунок 2.4 – Залежність кількості затриманих поїздів різних класів з наростаючим підсумком від моменту виникнення модельної затримки приміського поїзда № 161 у непарному напрямку руху

Затримка вантажного поїзда спричинила каскад затримок інших вантажних поїздів на ділянці, що мають однаковий найвищий пріоритет. Пасажирські поїзди, маючи найвищий пріоритет, уникли затримки, тоді як один приміський поїзд попав у зону затримки вантажного, що стало наслідком його затримки (рисунок 2.5).

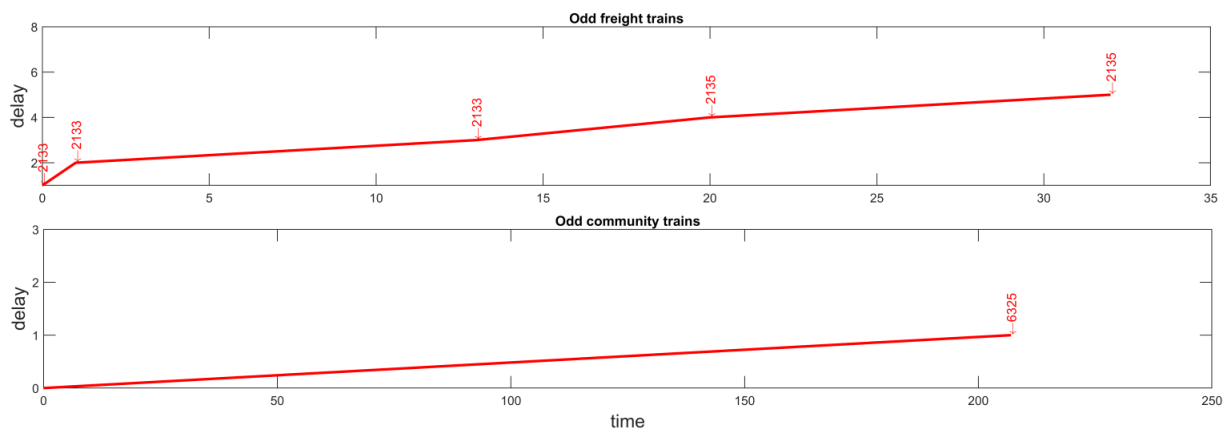


Рисунок 2.5 – Залежність кількості затриманих поїздів різних класів з наростаючим підсумком від моменту виникнення модельної затримки вантажного поїзда № 161 у непарному напрямку руху

Отримані дані були подані у вигляді набору векторів $\langle \bar{X}_q, \bar{Y}_q \rangle$ з перетворенням часу з хвилин у години. Дані були використанні при пошуку параметрів швидкості розповсюдження затримки в системі диференціальних рівнянь за допомогою розв’язання оптимізаційної моделі (2.2) методом ГА в середовищі Matlab. Візуалізація динаміки зміни значень фітнес-функції ГА наведена на рисунку 2.6.

За результатом розв’язання оптимізаційної моделі (2.2) були знайдені такі коефіцієнти $\beta^{1,1} = 0.0004$; $\beta^{1,2} = 0.0011$; $\beta^{1,3} = 0.0001$; $\beta^{2,1} = 0.0012$; $\beta^{2,2} = 0.1784$; $\beta^{2,3} = 0.0015$; $\beta^{3,1} = 0.0001$; $\beta^{3,2} = 0.0001$; $\beta^{3,3} = 0.0023$. Величина коефіцієнтів характеризує вплив одних категорій поїздів на інші, що дає змогу чисельно оцінити взаємовплив поїздів різної пріоритетності у графіку руху поїздів.

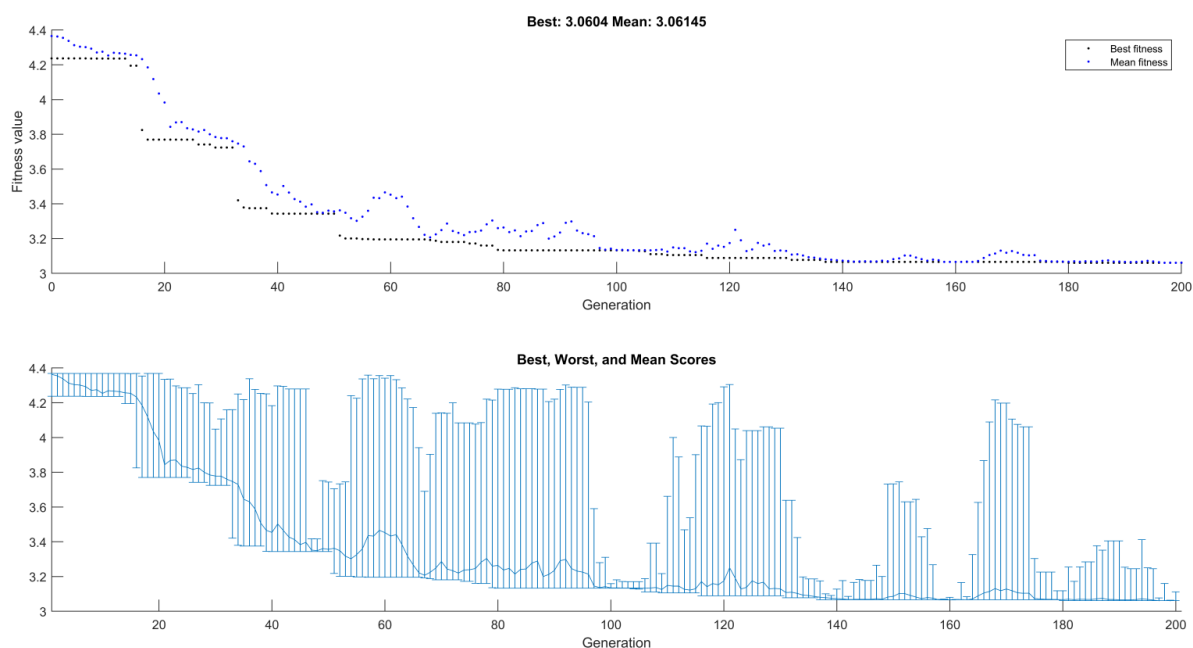


Рисунок 2.6 – Графік залежності кращих і середніх значень цільової функції F від кількості ітерацій ГА в процесі підбирання коефіцієнтів швидкості поширення затримки

Величина коефіцієнтів характеризує вплив одних категорій поїздів на інші, що дає змогу чисельно оцінити взаємовплив поїздів різної пріоритетності у графіку руху поїздів.

2.4. Розв'язання розробленої системи рівнянь SIR-моделі для моделювання процесу розповсюдження затримок поїздів на залізничній дільниці

Для практичної реалізації запропонованої математичної моделі в цьому підрозділі був розроблений програмний код у середовищі Matlab.

Відповідно до заданих вхідних умов $\langle \bar{X}_q, \bar{Y}_q \rangle$ трьох сценаріїв виникнення затримки ($q = 3$), емпіричні результати яких наведені на рисунках 2.3-2.5, були отримані модельні результати, наведені на рисунку 2.7. Середня абсолютна похибка (MAPE) між емпіричними та модельними результатами склала 3 %, що є високим результатом.

Для дослідження впливу величини резерву часу на надійність графіка руху поїздів були проведені експериментальні результати моделювання відновлення руху поїздів на досліджуваній дільниці. Запропоновано змінити початкові умови – затримати з дев'яти наявних п'ять пасажирських поїздів, $I^{r=1}(t=0) = 5$ поїздів. Виходячи з діючих нормативів використано такі параметри швидкості відновлення затримки в поїзді класу r на дільниці: $\gamma^{r=1} = 0.05$; $\gamma^{r=2} = 0.0667$; $\gamma^{r=3} = 0.10$. Початкові умови при $t = 0$ для моделювання $N^{r=1} = 9$ поїздів, $N^{r=2} = 4$ поїзди, $N^{r=3} = 32$ поїзди. Коефіцієнти швидкості поширення затримки $\beta^{r,l} \in \{3 \times 3\}$ приймались відповідно до наведених значень розв'язання оптимізаційної задачі, що наведені вище. Діаграму розмаху між емпіричними та модельними значеннями наведено на рисунку 2.8.

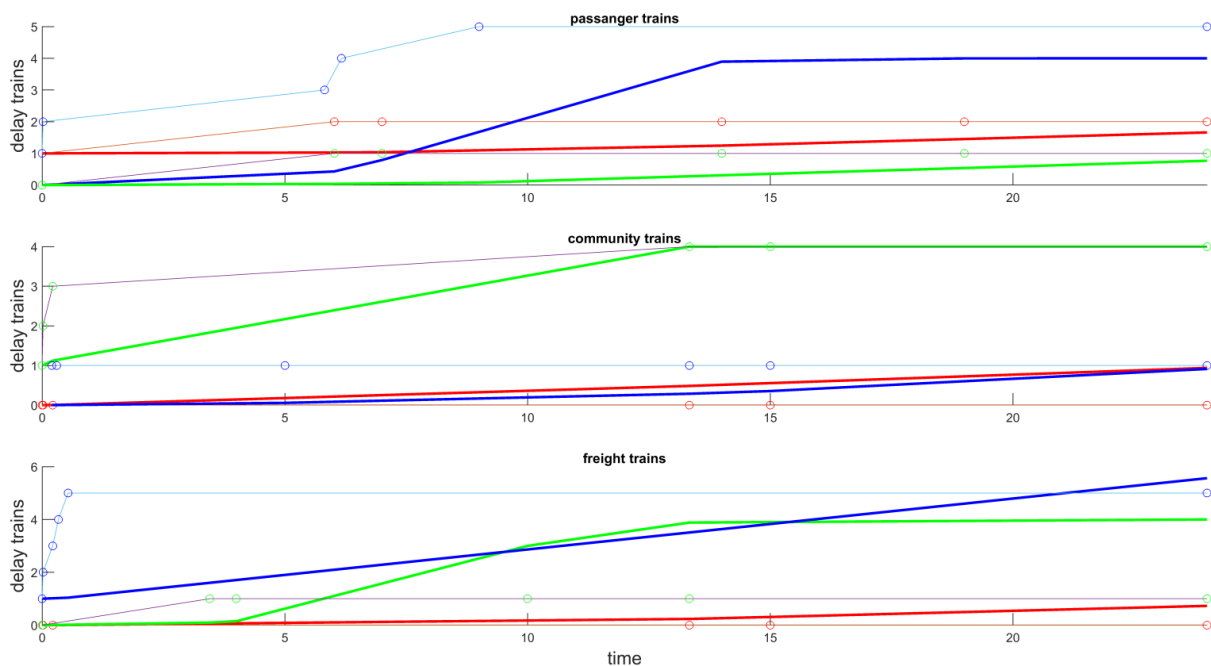


Рисунок 2.7 – Порівняльний графік динаміки кількості затриманих поїздів між емпіричними значеннями I^r і модельними I_m^r за трьома сценаріями затримки відповідно до $\langle \bar{X}_q, \bar{Y}_q \rangle$ на розрахунковій дільниці: тонка лінія з колами – емпіричні значення I^r ; жирна лінія – модельні значення I_m^r ; червоний колір – пасажирські поїзди $r=1$; зелений колір – приміські поїзди $r=2$; синій колір – вантажні поїзди $r=3$

Розв’язання розробленої системи рівнянь SIR моделі дало змогу отримати результати відновлення руху поїздів при виникненні затримки п’яти пасажирських поїздів на лінії Л – С (рисунок 2.9).

Початкові умови та значення станів поїздів різних класів r на лінії при $t=24$ год наведені в таблиці 2.1.

За результатами моделювання вперше чисельно визначено вплив поїздів різних категорій і величини їхнього резерву часу на надійність графіка руху на досліджуваній лінії. З п’яти затриманих поїздів при закладеному компенсаційному часі відновлення 20 хв вдається відновити рух 47 % поїздів загальної кількості затриманих. При цьому затримка п’яти пасажирських поїздів (вищий пріоритет руху) призвела до затримок інших поїздів. Закладений час відновлення для приміських і вантажних поїздів дав змогу відновити рух відповідно 51 і 83 % поїздів загальної кількості затриманих.

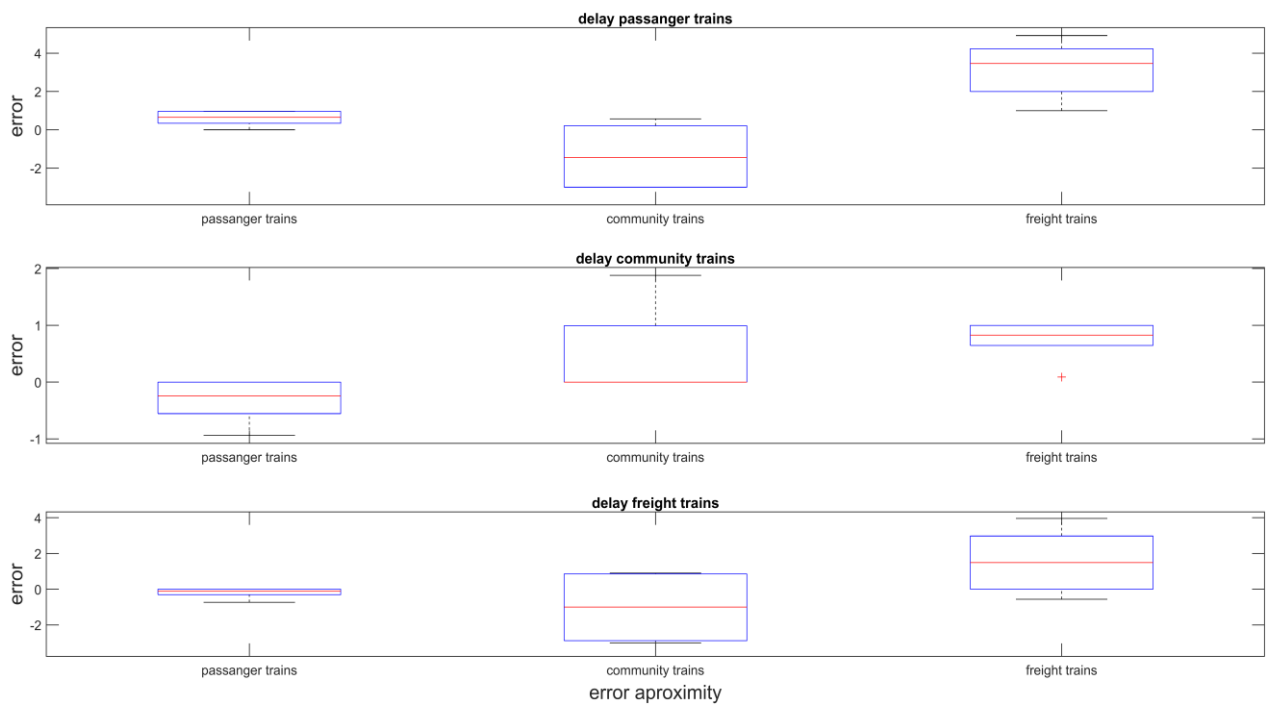


Рисунок 2.8 – Діаграма розмаху між емпіричними значеннями I^r та модельними I_m^r кількості затриманих поїздів за трьома сценаріями затримки відповідно до $\langle \bar{X}_q, \bar{y}_q \rangle$ на розрахунковій ділянці

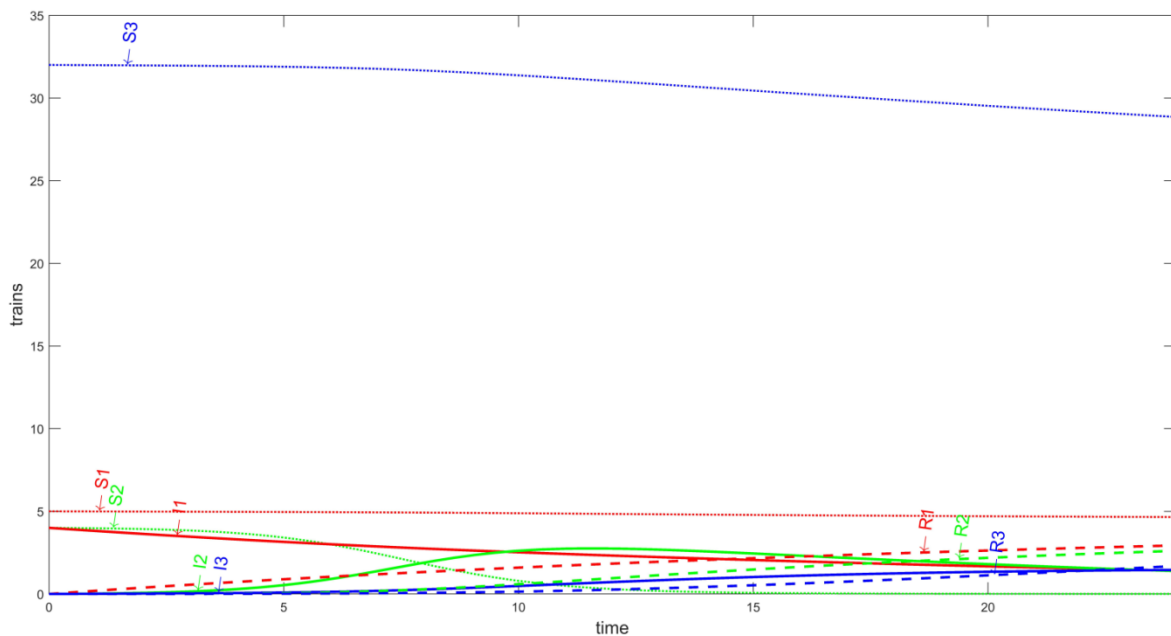


Рисунок 2.9 – Графік динаміки зміни станів потоків поїздів в умовах відновлення руху поїздів протягом доби ($t=24$ год) при виникненні затримки п'яти пасажирських поїздів на лінії Л – С:
 червоний колір – пасажирські поїзди $r=1$; зелений колір – приміські поїзди $r=2$; синій колір – вантажні поїзди $r=2$

Таблиця 2.1 – Результати моделювання відновлення руху поїздів протягом доби ($t = 24$ год) при виникненні затримки п'яти пасажирських поїздів на лінії Л–С

Стан	Пасажирські поїзди $r=1$	Приміські поїзди $r=2$	Вантажні поїзди $r=3$
Susceptible, $S^r(t=0)$	4	4	32
Infected, $I^r(t=0)$	5	0	0
Removed, $R^r(t=0)$	0	0	0
Susceptible, $S^r(t=24)$	3.699	0.003	28.735
Infected, $I^r(t=24)$	1.683	1.356	1.483
Removed, $R^r(t=24)$	3.618	2.641	1.783

2.5. Перевірка розробленої математичної моделі розповсюдження затримок поїздів на залізничній ділянці на адекватність

Дискретні варіаційні ряди різниці величин між емпіричними I^r та модельними значеннями I_m^r кількості затриманих поїздів наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Різниця між емпіричними I^r та модельними значеннями I_m^r кількості затриманих поїздів за трьома сценаріями затримки відповідно до $\langle \bar{X}_q, \bar{y}_q \rangle$ на розрахунковій ділянці величини

$I^{r=1} - I_m^{r=1}$	$I^{r=2} - I_m^{r=2}$	$I^{r=3} - I_m^{r=3}$
-1,5285	0	0
-0,74697	0,967369	0,998856
-0,62499	0,959595	1,985021
-0,00209	0,789627	2,976843
-0,00016	0,583515	3,962703
0	-0,99136	-0,44192

Розрахунок параметрів наведено в таблиці 2.3.

Для оцінювання ряду розподілу знайдено такі показники:

- показники центра розподілу:

$$\text{середня зважена (вибіркова середня)} \bar{x} = \frac{\sum x_i \cdot f_i}{\sum f_i} = \frac{-2,90}{6} = -0,484.$$

Таблиця 2.3 – Таблиця для розрахунку показників

x_i	Кіль- кість f_i	$x_i \cdot f_i$	Накопичена частота S	$ x - x_{cp} \cdot f_i$	$(x - x_{cp})^2 \cdot f_i$	Відносна частота f_i/f
-1,5285	1	-1,528	1	1,045	1,091	0,167
-0,74697	1	-0,747	2	0,263	0,0693	0,167
-0,62499	1	-0,625	3	0,141	0,0199	0,167
-0,00209	1	-0,00209	4	0,482	0,232	0,167
-0,00016	1	-0,00016	5	0,484	0,234	0,167
0	1	0	6	0,484	0,234	0,167
Разом	6	-2,903		2,898	1,881	1

Знаходимо x_i , при якому накопичена частота S буде більше $\Sigma f / 2 = 4$. Це значення $x_i = -0,00015941722130697$. Отже, медіана дорівнює $0,00015941722130697$. Медіана є прийнятною характеристикою при асиметричному розподілі даних, тому що навіть за наявності «викидів» даних медіана більш стійка до впливу відхилень даних;

- показники варіації. Абсолютні показники варіації.

Розмах варіації – різниця між максимальним і мінімальним значеннями ознаки первинного ряду.

$$R = x_{\max} - x_{\min} = 0 - (-1,5284998970741) = 1,5284998970741.$$

Для врахування відмінності всіх одиниць досліджуваної сукупності запропоновано розрахувати середнє лінійне відхилення:

$$d = \frac{\sum |x_i - \bar{x}_i| \cdot f_i}{\sum f_i} = \frac{2,9}{6} = 0,48.$$

Кожне значення ряду відрізняється від іншого в середньому на 0,48;

- дисперсія – характеризує міру розкиду близько її середнього значення (міра розсіювання, тобто відхилення від середнього):

$$D = \frac{\sum (x_i - \bar{x}_i)^2 \cdot f_i}{\sum f_i} = \frac{1,881}{6} = 0,313;$$

- незміщену оцінку дисперсії розраховано за виразом

$$S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x}_i)^2 \cdot f_i}{\sum f_i - 1} = \frac{1,881}{5} = 0,376;$$

- середнє квадратичне відхилення

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{0,313} = 0,56.$$

Кожне значення ряду відрізняється від середнього значення -0,484 в середньому на 0,56;

- оцінювання середньоквадратичного відхилення:

$$s = \sqrt{S^2} = \sqrt{0,376} = 0,613.$$

Після розрахування показників виконується перевірка гіпотези про те, що $X = \{ x_i \}$ розподілено за нормальним законом за допомогою критерію узгодженості Пірсона.

$$\chi^2 = \sum \frac{(f_i - f_i^*)^2}{f_i^*},$$

де f_i^* – теоретичні частоти, $f_i^* = \frac{N \cdot h}{\sigma} \phi_i$.

Розрахування теоретичних частот за умови таких показників: $N = 6$, $h = 0.78152507968303$ (ширина інтервалу), $\sigma = 0.56$, $x_{cp} = -0.484$ (таблиця 2.4).

Розрахування параметрів для знаходження спостережуваного значення критерію Пірсона наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.4 – Показники для розрахування теоретичних частот

i	x_i	u_i	ϕ_i	f_i^*
1	-1,5285	-1,8661	0,0694	0,581
2	-0,74697	-0,4701	0,3555	2,978
3	-0,62499	-0,2522	0,3857	3,231
4	-0,00209	0,8604	0,2732	2,288
5	-0,00016	0,8638	0,2732	2,288
6	0	0,8641	0,2732	2,288

Таблиця 2.5 – Розрахування параметрів для знаходження спостережуваного значення критерію Пірсона

i	f_i	f_i^*	$f_i - f_i^*$	$(f_i - f_i^*)^2$	$(f_i - f_i^*)^2 / f_i^*$
1	1	0,5813	-0,4187	0,1753	0,302
2	1	2,9776	1,9776	3,9107	1,313
3	1	3,2305	2,2305	4,9751	1,54
4	1	2,2882	1,2882	1,6596	0,725
5	1	2,2882	1,2882	1,6596	0,725
6	1	2,2882	1,2882	1,6596	0,725
Σ	6	6			5,331

Визначимо межі критичної області. Оскільки статистика Пірсона вимірює різницю між емпіричним і теоретичним розподілами, то чим більше її значення χ^2 , тим сильніше аргумент проти основної гіпотези.

Тому критична область для цієї статистики завжди правобічна: $[\chi_{кр}; +\infty)$. Її межу $K_{кр} = \chi^2(k-r-1; \alpha)$ знаходимо за таблицями розподілу χ^2 і заданими значеннями σ , $k=6$, $r=2$ (параметри $x_{ср}$ і σ оцінені за вибіркою). $\chi_{кр}(0,05; 3) = 7.81473$; $\chi_{сн}^2 = 5,33$. Спостережуване значення статистики Пірсона не потрапляє у критичну область $\chi^2 < \chi_{кр}$, тому нема підстав відкидати основну гіпотезу. Справедливе припущення про те, що ці вибірки мають нормальний розподіл. Отже, кожне значення ряду відрізняється від середнього значення $-0,484$ приблизно на $0,56$. Перевірка гіпотези за критерієм узгодженості Пірсона показала, що нема підстав відкидати гіпотезу про нормальний закон розподілу.

За аналогічною послідовністю проведено розрахунок для відхилень між емпіричними та модельними значеннями кількості затриманих приміських поїздів згідно з наведеними значеннями в таблиці 2.2. Розрахування параметрів наведено в таблиці 2.6. Відсортовано ряд за зростанням і підраховано кількість повторень для кожного елемента ряду.

Таблиця 2.6 – Таблиця для розрахування показників

x_i	Кількість f_i	$x_i \cdot f_i$	Накопичена частота S	$ x-x_{ср} \cdot f_i$	$(x-x_{ср})^2 \cdot f_i$	Відносна частота f_i/f
-0,99136	1	-0,99	1	1,376	1,894	0,167
0	1	0	2	0,385	0,148	0,167
0,583515	1	0,584	3	0,199	0,0395	0,167
0,789627	1	0,79	4	0,405	0,164	0,167
0,959595	1	0,96	5	0,575	0,33	0,167
0,967369	1	0,967	6	0,583	0,339	0,167
Разом	6	2,309		3,522	2,915	1

Для оцінювання ряду розподілу знайдено такі показники:

- показники центра розподілу:

$$\text{середня зважена (вибіркова середня)} \bar{x} = \frac{\sum x_i \cdot f_i}{\sum f_i} = \frac{2,309}{6} = 0,384.$$

Знаходимо x_i , при якому накопичена частота S буде більше $\sum f / 2 = 4$. Це значення $x_i = 0,959595495$. Отже, медіана дорівнює $-0,959595495$. Медіана є прийнятною характеристикою при асиметричному розподілі даних, тому що навіть за наявності «викидів» даних медіана більш стійка до впливу відхилень даних;

- показники варіації. Абсолютні показники варіації.

Розмах варіації - різниця між максимальним і мінімальним значеннями ознаки первинного ряду.

$$R = x_{\max} - x_{\min} = 0,967369342 - (-0,991363211) = 1,958732553.$$

Для врахування відмінності всіх одиниць досліджуваної сукупності запропоновано розрахувати середнє лінійне відхилення

$$d = \frac{\sum |x_i - \bar{x}_i| \cdot f_i}{\sum f_i} = \frac{3,522}{6} = 0,587.$$

Кожне значення ряду відрізняється від іншого в середньому на 0,587;

- дисперсія – характеризує міру розкиду близько її середнього значення (міра розсіювання, тобто відхилення від середнього):

$$D = \frac{\sum (x_i - \bar{x}_i)^2 \cdot f_i}{\sum f_i} = \frac{2,915}{6} = 0,486;$$

- незміщену оцінку дисперсії розраховано за виразом

$$S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x}_i)^2 \cdot f_i}{\sum f_i - 1} = \frac{2,915}{5} = 0,583;$$

- середнє квадратичне відхилення

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{0,486} = 0,697.$$

Кожне значення ряду відрізняється від середнього значення 0,385 в середньому на 0,697;

- оцінювання середньоквадратичного відхилення:

$$s = \sqrt{S^2} = \sqrt{0,583} = 0,764.$$

Після розрахування показників виконується перевірка гіпотези про те, що $X = \{ x_i \}$ розподілено за нормальним законом за допомогою критерію узгодженості Пірсона.

$$\chi^2 = \sum \frac{(f_i - f_i^*)^2}{f_i^*},$$

де f_i^* – теоретичні частоти, $f_i^* = \frac{N \cdot h}{\sigma} \phi_i$.

Розрахування теоретичних частот за умови таких показників: $N = 6$, $h = 0,991363211$ (ширина інтервалу), $\sigma = 0,697$, $x_{cp} = 0,385$ (таблиця 2.7).

Таблиця 2.7 – Показники для розрахування теоретичних частот

i	x_i	u_i	ϕ_i	f_i^*
1	-0,99136	-1,9743	0,0562	0,48
2	0	-0,552	0,341	2,91
3	0,583515	0,2851	0,3825	3,264
4	0,789627	0,5808	0,3352	2,86
5	0,959595	0,8247	0,2827	2,412
6	0,967369	0,8358	0,2803	2,392

Розрахування параметрів для знаходження спостережуваного значення критерію Пірсона наведено в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Розрахування параметрів для знаходження спостережуваного значення критерію Пірсона

i	f_i	f_i^*	$f_i - f_i^*$	$(f_i - f_i^*)^2$	$(f_i - f_i^*)^2 / f_i^*$
1	1	0,4796	-0,5204	0,2708	0,565
2	1	2,91	1,91	3,6481	1,254
3	1	3,2641	2,2641	5,1263	1,57
4	1	2,8605	1,8605	3,4614	1,21
5	1	2,4125	1,4125	1,9951	0,827
6	1	2,392	1,392	1,9376	0,81
Σ	6	6			6,236

Визначимо межі критичної області. Оскільки статистика Пірсона вимірює різницю між емпіричним і теоретичним розподілами, то чим більше її значення χ^2 , тим сильніше аргумент проти основної гіпотези. Тому критична область для цієї статистики завжди правобічна: $[\chi_{кр}; +\infty)$. Її межу $\chi_{кр} = \chi^2(k-r-1; \alpha)$ знаходимо за таблицями розподілу χ^2 і заданими значеннями σ , $k = 6$, $r = 2$ (параметри $x_{ср}$ і σ оцінені за вибіркою). $\chi_{кр}(0,05; 3) = 7.81473$; $\chi_{сн}^2 = 6,24$. Спостережуване значення статистики Пірсона не потрапляє у критичну область $\chi^2 < \chi_{кр}$, тому нема підстав відкидати основну гіпотезу. Справедливе припущення про те, що ці вибірки мають нормальний розподіл. Перевірка гіпотези за критерієм узгодженості Пірсона показала, що нема підстав відкидати гіпотезу про нормальний закон розподілу.

За аналогічною послідовністю проведено розрахування для відхилень між емпіричними та модельними значеннями кількості затриманих вантажних поїздів згідно з наведеними значеннями в таблиці 2.2. Розрахування параметрів наведено в таблиці 2.9. Відсортовано ряд за зростанням і підраховано кількість повторень для кожного елемента ряду.

Таблиця 2.9 – Таблиця для розрахування показників

x_i	Кількість f_i	$x_i \cdot f_i$	Накопичена частота S	$ x - x_{cp} \cdot f_i$	$(x - x_{cp})^2 \cdot f_i$	Відносна частота f_i/f
-0,44192	1	-0,442	1	2,022	4,089	0,167
0	1	0	2	1,58	2,497	0,167
0,998856	1	0,999	3	0,581	0,338	0,167
1,985021	1	1,985	4	0,405	0,164	0,167
2,976843	1	2,977	5	1,397	1,95	0,167
3,962703	1	3,963	6	2,382	5,676	0,167
Разом	6	2,309		3,522	2,915	1

Для оцінювання ряду розподілу знайдено такі показники:

- показники центра розподілу:

$$\text{середня зважена (вибіркова середня)} \bar{x} = \frac{\sum x_i \cdot f_i}{\sum f_i} = \frac{9,481503222}{6} = 1,58.$$

Знаходимо x_i , при якому накопичена частота S буде більше $\sum f / 2 = 4$. Це значення $x_i = 2,976842806$. Отже, медіана дорівнює 2,976842806. Медіана є прийнятною характеристикою при асиметричному розподілі даних, тому що навіть за наявності «викидів» даних медіана більш стійка до впливу відхилень даних;

- показники варіації. Абсолютні показники варіації.

Розмах варіації - різниця між максимальним і мінімальним значеннями ознаки первинного ряду.

$$R = x_{\max} - x_{\min} = 3,962702622 - (-0,441918608) = 4,40462123.$$

Для врахування відмінності всіх одиниць досліджуваної сукупності запропоновано розрахувати середнє лінійне відхилення:

$$d = \frac{\sum |x_i - \bar{x}_i| \cdot f_i}{\sum f_i} = \frac{8,368}{6} = 1,395.$$

Кожне значення ряду відрізняється від іншого в середньому на 1,395;

- дисперсія – характеризує міру розкиду близько її середнього значення (міра розсіювання, тобто відхилення від середнього):

$$D = \frac{\sum (x_i - \bar{x}_i)^2 \cdot f_i}{\sum f_i} = \frac{14,715}{6} = 2,452;$$

- незміщена оцінка дисперсії розрахована за виразом

$$S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x}_i)^2 \cdot f_i}{\sum f_i - 1} = \frac{14,715}{5} = 2,943;$$

- середнє квадратичне відхилення

$$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{2,452} = 1,566.$$

Кожне значення ряду відрізняється від середнього значення 1,58 в середньому на 1,566;

- оцінювання середньоквадратичного відхилення

$$s = \sqrt{S^2} = \sqrt{0,2,943} = 1,716.$$

Після розрахування показників виконується перевірка гіпотези про те, що $X = \{ x_i \}$ розподілено за нормальним законом за допомогою критерію узгодженості Пірсона.

$$\chi^2 = \sum \frac{(f_i - f_i^*)^2}{f_i^*},$$

де f_i^* – теоретичні частоти, $f_i^* = \frac{N \cdot h}{\sigma} \phi_i$.

Розрахування теоретичних частот за умови таких показників. $N = 6$, $h=0,441918608$ (ширина інтервалу), $\sigma = 1,566$, $x_{cp} = 1,58$ (таблиця 2.10).

Розрахування параметрів для знаходження спостережуваного значення критерію Пірсона наведено в таблиці 2.11.

Таблиця 2.10 – Показники для розрахування теоретичних частот

i	x_i	u_i	ϕ_i	f_i^*
1	-0,44192	-1,2913	0,1714	0,29
2	0	-1,0091	0,2396	0,406
3	0,998856	-0,3713	0,3712	0,628
4	1,985021	0,2585	0,3857	0,653
5	2,976843	0,8918	0,2661	0,451
6	3,962703	1,5213	0,1238	0,21

Таблиця 2.11 – Розрахування параметрів для знаходження спостережуваного значення критерію Пірсона

i	f_i	f_{i}^{*}	$f_i - f_i^*$	$(f_i - f_i^*)^2$	$(f_i - f_i^*)^2 / f_i^*$
1	1	0,2902	-0,7098	0,5038	1,736
2	1	0,4057	-0,5943	0,3532	0,871
3	1	0,6285	-0,3715	0,138	0,22
4	1	0,653	-0,347	0,1204	0,184
5	1	0,4505	-0,5495	0,3019	0,67
6	1	0,2096	-0,7904	0,6247	2,98
Σ	6	6			6,661

Визначимо межу критичної області. Оскільки статистика Пірсона вимірює різницю між емпіричним і теоретичним розподілами, то чим більше її значення χ^2 , тим сильніше аргумент проти основної гіпотези. Тому критична область для цієї статистики завжди правобічна: $[\chi_{кр}; +\infty)$. Її межу $\chi_{кр} = \chi^2(k-r-1; \alpha)$ знаходимо за таблицями розподілу χ^2 і заданими значеннями σ , $k = 6$, $r = 2$ (параметри $x_{ср}$ і σ оцінені за вибіркою).

$\chi_{кр}(0,05; 3) = 7,81473$; $\chi_{сп}^2 = 6,66$. Спостережуване значення статистики Пірсона не потрапляє у критичну область $\chi^2 < \chi_{кр}$, тому нема підстав відкидати основну гіпотезу. Справедливе припущення про те, що дані вибірки мають нормальний розподіл. Перевірка гіпотези за критерієм узгодженості Пірсона показала, що нема підстав відкидати гіпотезу про нормальний закон розподілу.

За проведеними розрахунками, варіаційні ряди різниці величин між емпіричними та модельними значеннями кількості затриманих поїздів кожної з категорій підпорядковуються нормальному розподілу. Отже, результати моделювання є адекватними.

Отже, попередніми дослідженнями доведено, що найбільш невивченим є час для відновлення в нитці, розподілений за способом компенсації під час руху (англ. running time supplements). Компенсація при русі полягає у використанні різниці між мінімальним часом прямування поїзда по дільниці і тим, що запланований розкладом, і містить складову - час регулярної добавки (резерв), що додається до часу прямування поїзда по кожній дільниці відповідно до встановлених правил або експертного підходу. Згідно з аналізом практичних сценаріїв використання резервів у вигляді компенсаційного часу в нитці графіка виявлено, що важливим є вирішення завдання пошуку раціональних величин компенсаційного часу в нитках графіка поїздів різних категорій. Це дасть змогу знайти баланс між надійністю графіка руху та практичною пропускнуою спроможністю залізничної дільниці.

Для вирішення завдання пошуку раціональних величин компенсаційного часу в нитках графіка поїздів різних категорій запропоновано формалізувати процес розповсюдження затримок поїздів на залізничній лінії з урахуванням взаємовпливу поїздів різних категорій і величини їхнього резерву часу. Запропоновано метод дослідження впливу величини резерву часу на надійність графіка руху поїздів на основі

модифікованої епідеміологічної SIR-моделі. За спеціально розробленим алгоритмом отримано емпіричні дані щодо розповсюдження затримок поїздів на дільниці.

За результатами моделювання вперше чисельно визначено вплив поїздів різних категорій і величини їхнього резерву часу на надійність графіка руху на досліджуваній лінії. З п'яти затриманих поїздів при закладеному компенсаційному часі відновлення вдається відновити рух 47 % поїздів загальної кількості затриманих. При цьому затримка п'яти пасажирських поїздів (вищий пріоритет руху), призвела до затримок інших поїздів. Закладений час відновлення для приміських і ватажних поїздів дав змогу відновити рух відповідно 51 та 83 % поїздів загальної кількості затриманих.

Проведено перевірку отриманих результатів моделювання розповсюдження затримок поїздів на дільниці на точність і адекватність. Середня абсолютна похибка (MAPE) між емпіричними та модельними результатами склала 3 %, що є високим результатом. Перевірка гіпотези за критерієм узгодженості Пірсона показала, що нема підстав відкидати гіпотезу про нормальний закон розподілу. За проведеними розрахунками, варіаційні ряди різниці величин між емпіричними та модельними значеннями кількості затриманих поїздів кожної з категорій підпорядковуються нормальному розподілу. Отже, результати моделювання є адекватними. Отримані результати моделювання відновлення руху поїздів на дільниці свідчать про те, що запропонована математична модель для формалізації процесу розповсюдження затримок поїздів на залізничній дільниці є достатньо точною для практичного застосування.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАТРИМОК ПОЇЗДІВ У ЗАЛІЗНИЧНИХ МЕРЕЖАХ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕПІДЕМІОЛОГІЧНИХ SIR-МОДЕЛЕЙ

3.1. Просторове подання проблеми розповсюдження затримок поїздів у залізничній системі

У межах вирішення поставленого завдання щодо моделювання розповсюдження затримок поїздів на макрорівні функціонування залізничної мережі в роботі запропоновано подати топологію залізничної мережі у вигляді неорієнтованого графа $G(P,E)$ [42, 43]. Множина вершин графа P відповідає залізничним станціям, на яких виконуються технічні та технологічні операції з обробки поїздопотоків. Відповідно їх розглядають обмежувальними для поділу мережі на ділянки з однаковими експлуатаційними умовами руху, $i,j \in P$, де $i = \overline{1,n}$, $j = \overline{1,n}$; E – множина ребр e_{ij} , що з'єднують відповідні вершини графа та відповідають залізничним ділянкам між станціями мережі, де $e_{ij} \in E$, $i, j = \overline{1,n}$ (рисунок 3.1).

Зі специфікою технологічних операцій і пріоритетності руху важливо враховувати різні типи потоків поїздів: пасажирський, приміський і вантажний рух. Отже, позначимо через r тип поїздопотуку, $r=1, 2, 3$. Відповідно до заданих розмірів руху кожного потоку поїздів r на мережі існують задані їхні маршрути. Кількість поїздів у потоці запропоновано записати за допомогою параметра $f_{ij}^{st,r}$, $s,t \in P$, де s – станція джерела потоку поїздів, t – станція призначення для потоку поїздів. Отже, через $f_{ij}^{st,r}$ – потік поїздів r -го типу по ребру або ділянці e_{ij} , що відповідає кількості поїздів, що прямують із s у t , $f_{ij}^{st,r} > 0$. Для спрощення представлення занумеруємо

кожен маршрут $\langle s, t \rangle$ параметром μ . Кожен маршрут поїздопотоку r із пункту відправлення s до пункту прибуття t можна подавати впорядкованою множиною ребер: $\mu = (e_{ij}, \dots, e_{ij}), \forall e_{ij} \in \mu$. Тоді $f_{ij}^{\mu, r}$ – це кількість поїздів r -го потоку на маршруті μ , що прямують через ділянку e_{ij} .

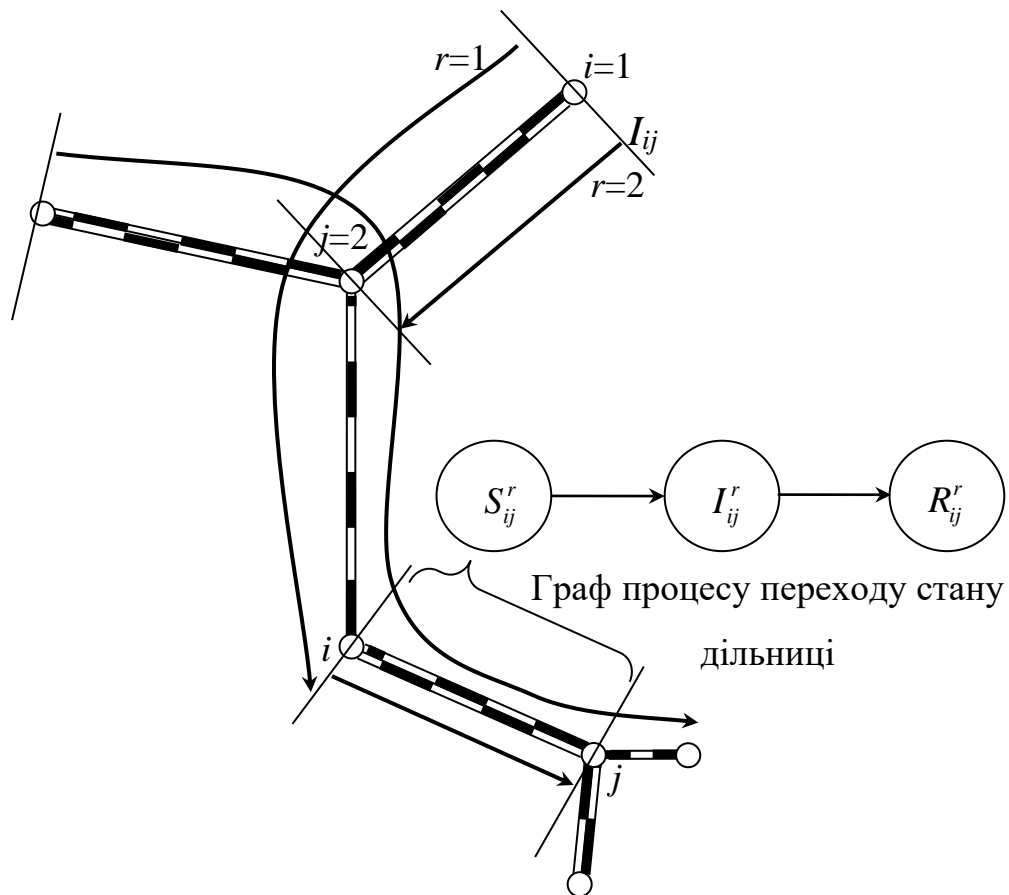


Рисунок 3.1 – Граф мережі $G(P, E)$, потоки поїздів і подання процесу переходу стану ділянки відповідно до моделі SIR

Важливим фактором, що впливає на показники поширення затримок, є характеристика інфраструктури залізничної ділянки, зокрема кількість колій. Для моделювання різних варіантів інфраструктури ділянки для кожного ребра графа G введено змінну функцію

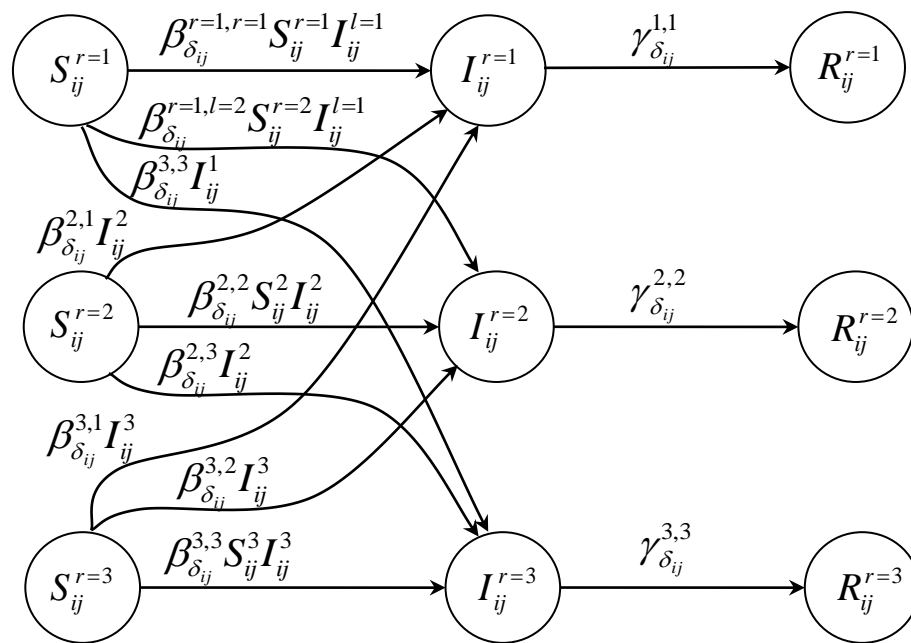
$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{одноколійна} & \text{дільниця } ij, \\ 2, & \text{одноколійно – двоклоїйна} & \text{дільниця } ij, \\ 3, & \text{двоклоїйна} & \text{дільниця } ij. \end{cases}$$

Для опису можливостей щодо пропускання кількості поїздів через дільницю ребрам присвоєно параметр $N_{\delta_{ij}}^{\max}$, що відповідає наявній пропускній спроможності дільниці в напрямку руху ij [44, 45].

3.1.1. Епідеміологічна математична модель розповсюдження затримок поїздів на графі залізничної мережі

На макрорівні залізничної мережі динаміку процесу розповсюдження затримок поїздів у мережі можна подати як неперервний хвилеподібний процес, що може розвиватись з різною амплітудою. Подібну динаміку можна описати математичними моделями розповсюдження інфекційних захворювань, що досить давно застосовуються в медицині [46, 47]. З класичних математичних моделей епідеміології в роботі запропоновано застосувати SIR-модель (англ. Susceptible-Infected-Removed model), що описує епідемію з одужанням. Адаптуючи цю модель до задачі моделювання динаміки поширення затримки в залізничній мережі, можна подати процес розповсюдження інфекційних хвороб через зараження як процес розповсюдження затримок поїздів, а одужання можна розглядати як відновлення руху після затримки. Отже, загальну кількість поїздів різних типів на дільниці слід умовно поділяти на схильних до захворювання (англ. Susceptible), інфікованих (англ. Infected) і тих, що одужали (англ. Removed). Отже, схильні – це $S(t)$, чутливі до затримки поїзди, що в момент часу t прямують за графіком руху. Інфіковані – це $I(t)$, поїзди, що прямують із затримкою та впливають на прямкування інших поїздів, передаючи їм затримку. Ті, що одужали, – $R(t)$, поїзди, що за час

прямування через залізничну дільницю з затримкою усунули її (виконали нагін), прямують за графіком або прибули на кінцеву станцію та не впливають на виникнення затримок у подальшому русі (рисунок 3.2). Під поняттям нагін розуміється скорочення часу запізнення до встановлених нормативів діючого нормативного розкладу руху або тривалості руху дільницею для вантажних поїздів.



Риунок 3.2 – Граф переходів між станами SIR-моделі, що має окремі групи пасажирських, приміських і вантажних поїздопотоків

Для підвищення точності моделювання важливо врахувати будь-який вплив поїздів різних типів на швидкість поширення затримки. Для прикладу, за нормативним документом [48], на залізничній мережі України, що належить до мереж без дотримання розкладу руху вантажних поїздів, найбільший вплив у залізничній мережі мають пасажирські поїзди далекого сполучення та приміські з причин їхньої пріоритетності та важливості дотримання нормативного розкладу руху поїздів. Після

пасажирських поїздів нижчий пріоритет мають вантажні поїздопотоки, що прямують у мережі без дотримання розкладу, однак у випадку відхилення від запланованого диспетчерським персоналом плану руху мають значний вплив на поїзди вищої категорії. Для обліку впливу на силу поширення різних груп поїздопотоків у роботі запропоновано врахувати в класичній SIR-моделі гетерогенну епідеміологічну динаміку відповідно до роботи [54]. За таких умов у роботі передбачається весь потік поїздів на дільниці поділити на три класи відповідно до їхнього типу r . Слід зазначити, що в межах одного класу можна розрізняти різні категорії поїздів, наприклад за швидкістю руху, їхньою довжиною або масою тощо. Однак у цьому дослідженні зроблено припущення, що всі поїзди одного класу мають подібні характеристики процесів зараження (передачі затримки) і одужання (відновлення руху). Міграція між класами не передбачається.

Отже, розглянемо граф переходів між станами запропонованої SIR-моделі, що має три класи або типи поїздопотоків на дільниці ij .

За графом переходів, що характеризує стани дільниці, у графі G на рисунку 3.1 швидкість зміни кількості схильних до затримки поїздів на дільниці ij можна визначити як

$$\frac{dS_{ij}^r(t)}{dt} = -\sum_l \beta_{\delta_{ij}}^{r,l} \cdot S_{ij}^r(t) \cdot I_{ij}^l(t), \quad (3.1)$$

де S_{ij}^r – кількість схильних до затримки поїздів у класі r на дільниці ij , поїзд;

$\beta_{\delta_{ij}}^{r,l}$ – швидкість розповсюдження затримки від поїздопотоків r до поїздопотоків l на дільниці типу δ_{ij} , де $r = l$, $r, l \in R$;

I_{ij}^l – кількість інфікованих поїздів класу l на дільниці ij , поїзд;

t – час або крок моделювання, год.

Швидкість зміни кількості поїздів, що прямують через залізничну дільницю з затримкою, можна розрахувати як

$$\frac{dI_{ij}^r(t)}{dt} = \sum_l \beta_{\delta_{ij}}^{r,l} \cdot S_{ij}^r(t) \cdot I_{ij}^l(t) - \gamma_{\delta_{ij}}^r I_{ij}^r, \quad (3.2)$$

де I_{ij}^r – кількість затриманих поїздів у класі r на дільниці ij , поїзд;

$\gamma_{\delta_{ij}}^r$ – швидкість відновлення руху поїздопотоків r на дільниці типу δ_{ij} .

Поїзди, що прямували з затримкою та усунули її, переходять до групи $R_{ij}^r(t)$ зі швидкістю $\gamma_{\delta_{ij}}^r I_{ij}^r$, тому швидкість відновлення руху можна визначити як

$$\frac{dR_{ij}^r(t)}{dt} = -\gamma_{\delta_{ij}}^r I_{ij}^r. \quad (3.3)$$

Усі параметри системи мають додатні значення. Система рівнянь (3.1)-(3.3) має умову нормування вигляду $N_{ij}^r = S_{ij}^r(t) + I_{ij}^r(t) + R_{ij}^r$, де N_{ij}^r – загальна кількість поїздів класу r на дільниці ij , $N = \sum_r N^r$, N – загальна кількість поїздів усіх класів на дільниці. Початкові умови для системи (3.1)-(3.3) $(S_{ij,0}^r, I_{ij,0}^r, 0)$, де $S_{ij,0}^r, I_{ij,0}^r$ – кількість сприятливих і затриманих поїздів у класі r на дільниці ij при $t = 0$ відповідно.

Залежно від кількості колій на дільниці типу δ_{ij} запропоновано прив'язати $SIR_{\delta_{ij}}$ -модель з відповідними коефіцієнтами швидкості. Це дало змогу уніфікувати процес побудови SIR -моделей для кожного ребра ij (дільниці) графа та зменшити розмірність задачі.

Для обліку переходу кількості затриманих поїздів на сусідню дільницю графа G запропоновано кількість затриманих поїздів, що прямують як транзитні через вершину j , визначати за коефіцієнтом транзитності. Коефіцієнт транзитності визначається за виразом

$$I_{jk,transf}^r = \frac{I_{ij}^r \sum N_{ik}^r}{N_{ij}^r}, \quad (3.4)$$

де $I_{jk,transf}^r$ – кількість затриманих поїздів класу r , що є транзитними для вершини j і прямують на дільницю jk , $j=k$, поїзд;

$\sum N_{ik}^r$ – загальний потік поїздів класу r , що прослідує вершину j в напрямі вершини k ;

k – номер вершини, що передує вершині j на ребрі графа G , поїзд.

Для кожної дільниці з характеристиками інфраструктури типу δ_{ij} запропоновано настроїти відповідну $SIR_{\delta_{ij}}$ -модель з рівняннями (3.1)–(3.3) за допомогою розв’язання оптимізаційної задачі для пошуку коефіцієнтів швидкості $\beta_{\delta_{ij}}^{r,l}$ розповсюдження затримки. Для настроювання моделей запропоновано використати дані про розповсюдження середньої затримки в нормативному графіку руху. Коефіцієнти швидкості в межах розв’язання оптимізаційної задачі генетичним алгоритмом підбираються на основі мінімізації середньої абсолютної похибки (MAPE) між емпіричними та результатами виходу після розв’язання системи рівнянь (3.1)–(3.3). Метод пошуку коефіцієнтів швидкості розповсюдження затримки математичної моделі та розв’язання системи диференціальних рівнянь у межах фітнес-функції наведено в підрозділі 2.3.

Згідно з вибудованою послідовністю розв’язується $SIR_{\delta_{ij}}$ -модель відповідної дільниці, що визначає параметри поширення затримки на графі. Для послідовного розв’язання $SIR_{\delta_{ij}}$ -моделей, що відповідають кожному ребру графа, розроблено алгоритм [55], який перетворює граф мережі на спрямоване дерево, коренем якого є станція виникнення затримки. Згідно до вибудованої послідовності розв’язується $SIR_{\delta_{ij}}$ модель відповідної дільниці, що визначає параметри поширення затримки на графі.

3.2. Результати моделювання розповсюдження затримок поїздів на графі залізничного полігона

У межах експериментальних досліджень у роботі отримані результати поширення затримок на реальних ділянках одного з залізничних полігонів АТ «Укрзалізниця». Виконане налаштування двох $SIR_{\delta ij}$ -моделей для восьми залізничних ділянок, з яких дві $SIR_{\delta ij=2}$ -моделі відповідають одноколіно-двоколійній інфраструктурі ділянки, а всі інші - двоколійні $SIR_{\delta ij=3}$ -моделі.

Граф залізничного полігона з заданими потоками поїздів різних класів r подано на рисунку 3.3.

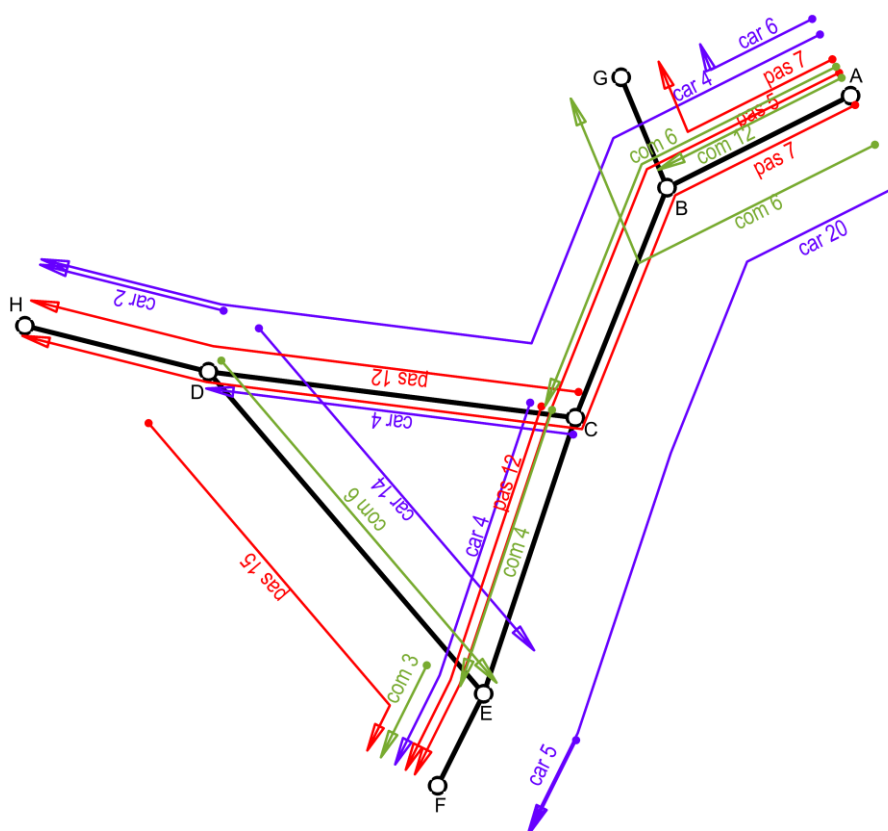
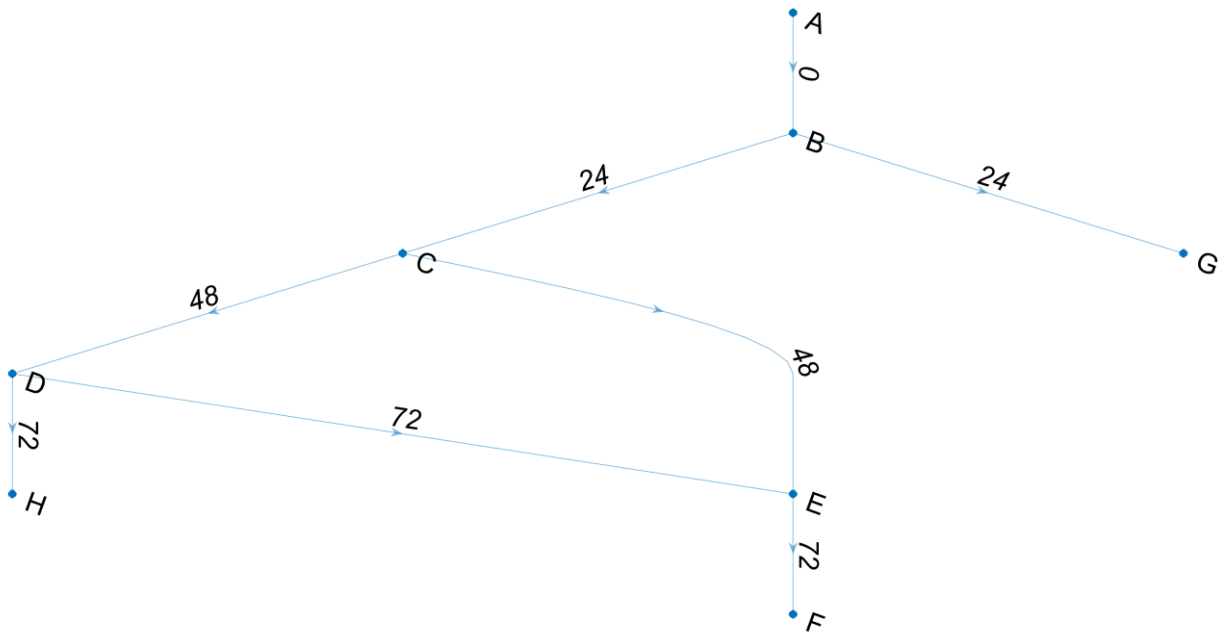


Рисунок 3.3 – Граф залізничного полігона з візуалізацією потоків поїздів різних класів

Початковою вершиною поширення модельної затримки на графі прийнята станція А. Для автоматичного визначення послідовності запуску систем $SIR_{\delta ij}$ -моделей у напрямку поширення затримки використано алгоритм для перетворення графа полігона у спрямований граф-дерево з вершиною-коренем – станція А.

На рисунку 3.4 наведено перетворений граф полігона у спрямоване дерево.



Риунок 3.4 – Граф-дерево з коренем у вершині А для послідовного розв’язку $SIR_{\delta ij}$ -моделей

У межах експерименту запропоновано дослідити спроможність відновлення руху за умови затримання чотирьох пасажирських і п’яти вантажних поїздів за умови відправлення зі станції А. Початкові умови дільниці А-В ($t=0$, 0): $S^{r=1}(t=0)=15$ пасажирських поїздів; $S^{r=2}(t=0)=28$ приміських поїздів; $S^{r=3}(t=0)=25$ вантажних поїздів; $I^{r=1}(t=0)=4$ поїзди; $I^{r=2}(t=0) = 0$ поїздів і $I^{r=3}(t=0)=5$ поїздів. Застосовані такі коефіцієнти відновлення затримки в поїздів класу r на дільниці: $\gamma^{r=1} = 0.05 \text{ год}^{-1}$;

$\gamma^{r=2} = 0.0667 \text{ год}^{-1}$; $\gamma^{r=3} = 0.10 \text{ год}^{-1}$. Коефіцієнти швидкості поширення затримки $\beta_{\delta_{ij}}^{r,l} \in \{3 \times 3\}$ приймалися відповідно до значень розв'язку оптимізаційної задачі настроювання відповідних $\text{SIR}_{\delta_{ij}}$ -моделей (пункт 2.3.1). Початкові умови та значення станів поїздів різних класів r на дільницях залізничного досліджуваного полігона наведені в таблиці 3.1.

Візуалізація графіків динаміки зміни станів потоків поїздів в умовах відновлення руху поїздів на дільницях залізничного полігона при виникненні затримок за умови відправлення на станції А наведено на рисунку 3.5.

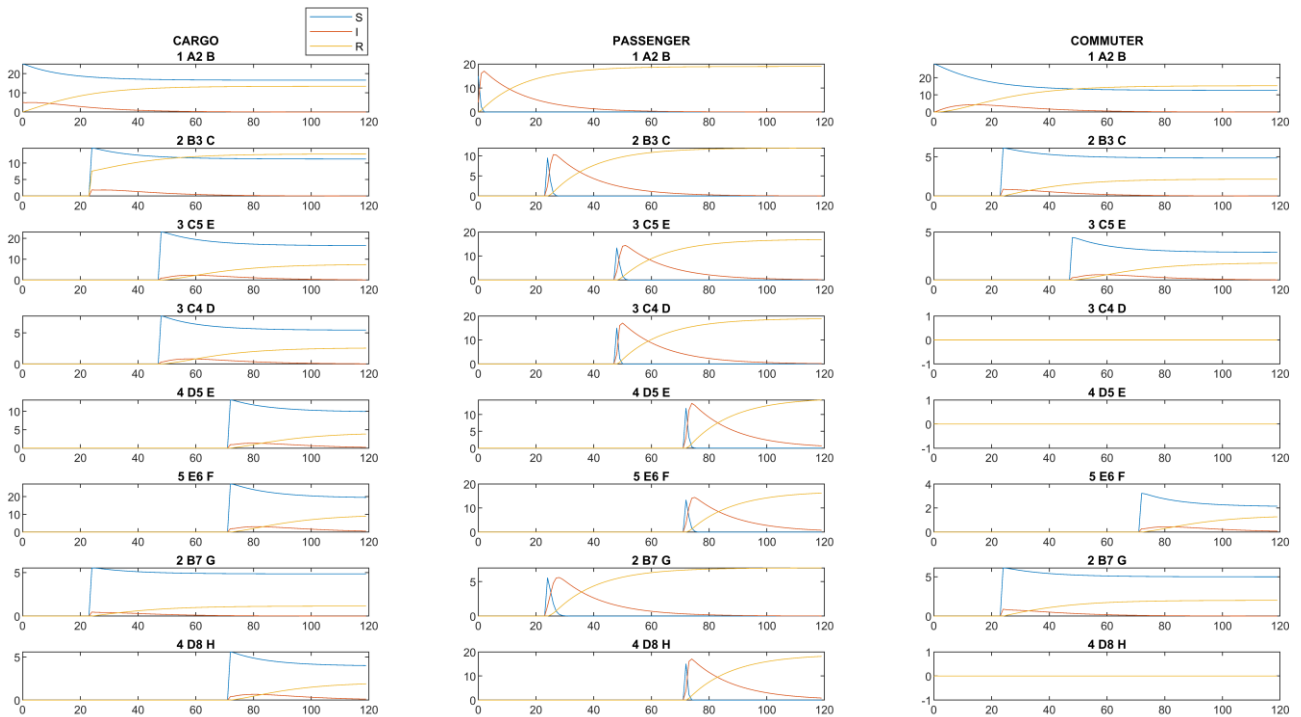


Рисунок 3.5 – Графіки динаміки зміни станів потоків поїздів в умовах відновлення руху поїздів на дільницях залізничного полігона при виникненні затримок за умови відправлення на станції А: жовтий колір – поїзди, схильні до затримки; синій колір – затримані поїзди; помаранчевий колір – поїзди, що відновили рух

Таблиця 3.1 – Результати моделювання відновлення руху поїздів на дільницях залізничного полігона

Дільниця	Пасажирські поїзди $r=1$	Приміські поїзди $r=2$	Вантажні поїзди $r=3$	Пасажирські поїзди $r=1$	Приміські поїзди $r=2$	Вантажні поїзди $r=3$	Пасажирські поїзди $r=1$	Приміські поїзди $r=2$	Вантажні поїзди $r=3$	Моделльний час	Ознака вектора для SIR
	S^r	S^r	S^r	I^r	I^r	I^r	R^r	R^r	R^r	t	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A-B	15	28	25	4	0	5	0	0	0	0	вхід
A-B	18,22	0,00	16,42	2,34	3,96	3,50	9,45	15,04	8,07	24	вихід
B-C	14,57	9,50	6,12	1,87	2,50	0,88	0,00	0,00	0,00	24	вхід
B-C	11,92	0,00	5,11	0,93	2,55	0,37	11,15	9,45	1,52	48	вихід
C-E	23,07	13,39	4,42	0,93	3,61	0,25	0,00	0,00	0,00	48	вхід
C-E	17,79	0,00	3,18	1,59	3,65	0,37	4,62	13,35	1,12	72	вихід
C-D	7,69	14,96	0,00	0,31	4,04	0,00	0,00	0,00	0,00	48	вхід
C-D	5,83	0,00	0,00	0,54	3,95	0,00	1,63	15,05	0,00	72	вихід
D-E	13,06	11,88	0,00	0,94	3,12	0,00	0,00	0,00	0,00	72	вхід
D-E	10,44	0,00	0,00	0,82	3,15	0,00	2,74	11,85	0,00	96	вихід
E-F	27,08	13,35	3,22	1,92	3,65	0,28	0,00	0,00	0,00	72	вхід
E-F	20,75	0,00	2,32	1,98	3,65	0,28	6,27	13,35	0,90	96	вихід
B-G	5,53	5,54	6,12	0,47	1,46	0,88	0,00	0,00	0,00	24	вхід
B-G	4,99	0,00	5,24	0,20	1,55	0,34	0,80	5,45	1,42	48	вихід
D-H	5,60	15,05	0,00	0,40	3,95	0,00	0,00	0,00	0,00	72	вхід
D-H	4,25	0,00	0,00	0,41	3,96	0,00	1,35	15,04	0,00	96	вихід

За результатами моделювання вперше чисельно визначений вплив «мережевого ефекту» на надійність руху поїздопотоків на розгалуженому залізничному полігоні. З чотирьох затриманих пасажирських поїздів при закладеному компенсаційному часі відновлення $0,05 \text{ год}^{-1}$ вдається послідовно на лінії A-B-C-E-F відновити рух відповідно від двох до трьох пасажирських поїздів, але на виході полігона по станції F все ж таки затримка залишається у двох поїздів.

Компенсаційний час резерву, закладений на лінії A-B-C-E-F, дає змогу з п'яти затриманих вантажних поїздів по станції A відновити рух чотирьом поїздам до станції F (затримано лише один вантажний поїзд (таблиця 3.1)).

Однак закладений час відновлення для поїздів на дільниці E-F не дає можливість відновити рух через затримки поїздів, переданих з попередньої дільниці D-E. Це потребує перегляду резервів часу в бік збільшення для дільниці E-F, або суміжної з нею D-E, для можливості усунення первинної затримки на залізничному полігоні.

Результати моделювання дали змогу оцінити вплив затримки на стабільність руху поїздопотоків при відхиленні від основної лінії A-B-C-E-F по станції С. На відхиленні лінії C-D-H первинна затримка призвела до виходу з полігона по станції Н одного затриманого пасажирського та чотирьох приміських поїздів. На дільниці A-B утворення первинної затримки було відновлено рух 58,4 % затриманих пасажирських поїздів і 70,1 % затриманих вантажних поїздів, чого стало недостатньо для усунення первинних затримок на полігоні, що має найбільш негативний вплив на приміські поїзди, які майже не вдається відновити на всіх дільницях полігона в умовах затримок пасажирських поїздів, що мають вищий пріоритет. Отримані результати моделювання підтвердили адекватність розв'язків на основі порівняння реальних умов роботи дільниць при затримках поїздів з модельними. Закладені коефіцієнти відновлення затримки відповідають нормативним у графіку руху і є недостатніми для повноцінного відновлення руху. Це доводить, що чинні в нормативному графіку руху величини резерву часу необхідно переглянути в бік збільшення.

Однією з важливих переваг цього методу моделювання є його швидкість розрахунків в умовах автоматизації. Отримані результати було досягнуто за 52,411585 с розрахування з параметрами обчислювальних потужностей Intel(R) Core(TM)i5-8250U CPUv 1,60GHz 1.80 GHz з ОЗУ 4 ГБ. Для порівняння, у дослідженні [41], де застосовано оптимізаційну математичну модель, що будує детальний графік руху поїздів, розрахування тільки для однієї дільниці триває до 7 хв. При ручному

способі побудови графіків руху, що є найбільш точним методом, перевірка на затримку тільки на одній дільниці може тривати декілька робочих днів.

Отримані результати моделювання розповсюдження затримок поїздів на розгалуженому залізничному полігоні свідчать про те, що запропонований метод моделювання на основі модифікованих епідеміологічних моделей є досить точним – похибка між емпіричними та модельними результатами складає до 10 % в умовах швидких розрахунків [26, 29, 42, 49]. Крім того, на відміну від відомих підходів до моделювання планового руху поїздів [50, 51] і мікромоделювання [41], цей метод дає змогу прогнозувати поширення затримок з урахуванням закладених величин резервів часу на відновлення руху в залізничних системах без дотримання розкладу руху вантажних поїздів. Результати підтверджені експериментальними дослідженнями поширення затримок на реальних дільницях одного з залізничних полігонів АТ «Укрзалізниця» (таблиця 3.1).

Перевагою застосування методу моделювання розповсюдження затримок поїздів є можливість використання на розгалужених залізничних полігонах з прийнятною швидкістю і точністю. Це дає змогу враховувати вплив «мережевого ефекту» [52]. Застосування цього підходу дасть змогу автоматизувати складний процес пошуку раціональних величин компенсаційного часу в нитках поїздів різних категорій на залізничній дільниці і, як наслідок, підвищити пунктуальність і надійність нормативних графіків руху поїздів.

3.3. Визначення раціональних резервів часу в нитках графіка на основі статистичної гри

Для визначення раціональних резервів часу в нитках графіка запропоновано виконувати вибір альтернативних стратегій закладених резервів, спираючись на оцінювання надійності ГРП за розрахуванням коефіцієнта готовності для кожної дільниці полігона.

Під надійністю в цьому дослідженні, за роботами [56-58], розуміється властивість системи – залізничної дільниці з технологічним процесом перевезень встановленим графіком руху поїздів - зберігати протягом заданого інтервалу часу (доба) в установлених межах значення точності виконання ГРП, що характеризують здатність виконувати основну функцію – пропускання поїздопотоків через дільницю. Під деталізуючою властивістю надійності розглядається безвідмовність. Під відмовою слід розуміти затримку поїзда по прибуттю або відправленню на кожній із станцій на дільниці. Показником оцінювання експлуатаційної надійності роботи дільниці є коефіцієнт готовності

$$\alpha_{експл\ ij} = \frac{N}{N + \sum_r I^r}, \quad (3.5)$$

де N – кількість поїздів на дільниці;

I^r – кількість затриманих поїздів категорії r на дільниці.

Оскільки пропускна спроможність на дільниці визначається за добовий період, то і коефіцієнт готовності необхідно визначати в розрахунку на добу.

Коефіцієнт готовності (3.5) запропоновано розраховувати після проведення моделювання згідно з розробленим методом (підрозділ 3.1) для кожного з варіантів закладення резервів часу. Кожен з варіантів закладення резервів запропоновано розглядати як стратегію A_i , а результат моделювання (розрахований коефіцієнт готовності) на кожній з дільниць – як стан природи Π_j , де j – номер дільниці за порядком на полігоні. За такої постановки отримана матриця формує статистичну гру, вибір найкращої стратегії якої може бути виконаний за декількома різними критеріями.

Для рекомендації більш зваженого рішення в цьому дослідженні запропоновано виконувати вибір за такими критеріями (рисунок 3.6) [60]: Вальда, Севіджа, Гурвіца, Байєса.

результати моделювання

дільниця	І	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
А-В	13	28	25	8	0	5	0	0	0	0	0	12
В-С	18,22	0,00	16,42	2,34	3,94	3,50	9,43	13,04	8,07	24	48	24
С-Е	14,57	9,50	6,12	1,87	2,50	0,88	0,00	0,00	0,00	24	48	48
С-Д	11,92	0,00	5,11	0,93	2,53	0,37	11,15	9,45	1,22	48	48	48
С-Е	23,07	13,39	4,42	0,93	3,61	0,25	0,00	0,00	0,00	48	48	48
С-Е	17,79	0,00	3,18	1,59	3,61	0,37	4,62	13,35	1,12	72	72	72
С-Е	7,69	14,94	0,00	0,31	4,04	0,00	0,00	0,00	0,00	48	48	48
С-Е	5,83	0,00	0,00	0,54	3,95	0,00	1,63	15,03	0,00	72	72	72
С-Е	13,06	11,88	0,00	0,94	3,12	0,00	0,00	0,00	0,00	72	72	72
С-Е	10,44	0,00	0,00	0,82	3,15	0,00	2,74	11,85	0,00	96	96	96
С-Е	27,08	13,35	3,22	1,92	3,60	0,24	0,00	0,00	0,00	72	72	72
С-Е	20,71	0,00	2,32	1,98	3,61	0,28	6,27	13,35	0,90	96	96	96
С-Е	5,53	5,54	6,12	0,47	1,44	0,88	0,00	0,00	0,00	24	24	24
С-Е	4,99	0,00	5,24	0,20	1,55	0,34	0,80	5,45	1,42	48	48	48
С-Е	5,60	15,03	0,00	0,40	3,91	0,00	0,00	0,00	0,00	72	72	72
С-Е	4,23	0,00	0,00	0,41	3,94	0,00	1,33	13,04	0,00	96	96	96

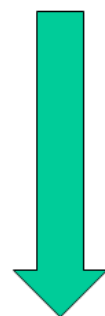
статистична гра

A _i	A-B	B-C	C-E	C-D	D-E	E-F	B-G	D-H
стратегія А ₁	0,9	0,886898	0,879329	0,834562	0,862677	0,880751	0,891598	0,82534
стратегія А ₂	0,75	0,88965	0,8756	0,8347	0,85634	0,84652	0,605489	0,76492
стратегія А ₃	0,95	0,86777	0,8793	0,834562	0,862677	0,880751	0,891598	0,82534

Показником оцінки експлуатаційної надійності роботи дільниці є коефіцієнт готовності

$$\alpha_{експл,ij} = \frac{N}{N + \sum_r I^r}$$

N ← загальна кількість поїздів у ГРП на дільниці
 $\sum_r I^r$ ← загальна кількість затриманих поїздів на дільниці



Вибір стратегії:

- за критерієм Вальда;
- за критерієм Севіджа;
- за критерієм Гурвіца;
- за критерієм Байєса.

Рисунок 3.6 – Схема послідовності вибору найбільш прийнятної стратегії закладення резервів на залізничному полгоні

Для прикладу, проведено розрахунок за матрицею статистичної гри, отриманою за результатами проведених трьох сценаріїв моделювання поширення затримок (таблиця 3.2).

За критерієм Вальда, за оптимальну приймається чиста стратегія, що в найгірших умовах гарантує максимальний виграш, тобто $a = \max(\min a_{ij})$. Критерій Вальда орієнтує статистику на найнесприятливіші стани природи, тобто цей критерій виражає песимістичну оцінку ситуації. Матриця для розрахунку наведена в таблиці 3.3.

Таблиця 3.2 – Матриця статистичної гри, отримана за результатами проведених трьох сценаріїв моделювання поширення затримок

A_i	$\Pi_j=1$ (A-B)	$\Pi_j=2$ (B-C)	$\Pi_j=3$ (C-E)	$\Pi_j=4$ (C-D)	$\Pi_j=5$ (D-E)	$\Pi_j=6$ (E-F)	$\Pi_j=7$ (B-G)	$\Pi_j=8$ (D-H)
стратегія A_1	0,900	0,887	0,879	0,835	0,863	0,881	0,892	0,825
стратегія A_2	0,750	0,890	0,876	0,835	0,856	0,847	0,605	0,765
стратегія A_3	0,950	0,868	0,879	0,835	0,863	0,881	0,892	0,825

Таблиця 3.3 – Матриця для розрахунку за критерієм Вальда

A_i	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5	Π_6	Π_7	Π_8	$\min(a_{ij})$
A_1	0,900	0,887	0,879	0,835	0,863	0,881	0,892	0,825	0,825
A_2	0,750	0,890	0,876	0,835	0,856	0,847	0,605	0,765	0,605
A_3	0,950	0,868	0,879	0,835	0,863	0,881	0,892	0,825	0,825

Вибираємо з (0.82534; 0.605489; 0.82534) максимальний елемент $\max=0.82534$. Отже, за критерієм Вальда приймається стратегія A_1 .

За критерієм Байеса, за оптимальну приймається та стратегія (чиста) A_i , при якій максимізується середній виграш a або мінімізується середній ризик r . Розраховуємо значення $\sum(a_{ij}p_j)$ (таблиця 3.4):

$$\begin{aligned} \sum(a_{1,j}p_j) &= 0.9*0.13 + 0.886898*0.13 + 0.879329*0.13 + 0.834562*0.13 + \\ &+ 0.862677*0.13 + 0.880751*0.13 + 0.891598*0.13 + 0.82534*0.13 = \\ &0.90495015, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum(a_{2,j}p_j) &= 0.75*0.13 + 0.88965*0.13 + 0.8756*0.13 + 0.8347*0.13 + \\ &+ 0.85634*0.13 + 0.84652*0.13 + 0.605489*0.13 + 0.76492*0.13 = 0.83501847, \end{aligned}$$

$$\sum(a_{3,j}p_j) = 0.95*0.13 + 0.86777*0.13 + 0.8793*0.13 + 0.834562*0.13 + 0.862677*0.13 + 0.880751*0.13 + 0.891598*0.13 + 0.82534*0.13 = 0.90895974.$$

Вибираємо з (0.90495015; 0.83501847; 0.90895974) максимальний елемент $\max=0.91$. Отже, за критерієм Байєса приймається стратегія А3.

Таблиця 3.4 – Матриця для розрахунку за критерієм Байєса

Ai	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	$\sum(a_{ij}p_j)$
A1	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,11	0,90
A2	0,10	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,08	0,10	0,84
A3	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,11	0,91
pj	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	

Критерій мінімального ризику Севіджа рекомендує вибирати як оптимальну стратегію ту, при якій величина максимального ризику мінімізується в найгірших умовах, тобто забезпечується $a = \min(\max r_{ij})$ [59].

Критерій Севіджа орієнтує статистику на найнесприятливіші стани природи, тобто цей критерій виражає песимістичну оцінку ситуації. Знаходимо матрицю ризиків (таблиця 3.5). Ризик - міра невідповідності між різними можливими результатами прийняття певних стратегій. Максимальний виграш в j -му стовпці $b_j = \max(a_{ij})$ характеризує сприятливість стану природи.

1. Розраховуємо перший стовпчик матриці ризиків:

$$r_{11} = 0.95 - 0.9 = 0.05; r_{21} = 0.95 - 0.75 = 0.2; r_{31} = 0.95 - 0.95 = 0.$$

2. Розраховуємо другий стовпчик матриці ризиків:

$$r_{12} = 0.88965 - 0.886898 = 0.0027520000000001; r_{22} = 0.88965 - 0.88965 = 0; r_{32} = 0.88965 - 0.86777 = 0.02188.$$

3. Розраховуємо третій стовпчик матриці ризиків:

$$r_{13} = 0.879329 - 0.879329 = 0; r_{23} = 0.879329 - 0.8756 = 0.003729; r_{33} = 0.879329 - 0.8793 = 2.90000000000057E-5.$$

4. Розраховуємо четвертий стовпчик матриці ризиків:

$$r_{14} = 0.8347 - 0.834562 = 0.000137999999999997; r_{24} = 0.8347 - 0.8347 = 0; r_{34} = 0.8347 - 0.834562 = 0.000137999999999997.$$

5. Розраховуємо п'ятий стовпчик матриці ризиків:

$$r_{15} = 0.862677 - 0.862677 = 0; r_{25} = 0.862677 - 0.85634 = 0.006337; r_{35} = 0.862677 - 0.862677 = 0.$$

6. Розраховуємо шостий стовпчик матриці ризиків:

$$r_{16} = 0.880751 - 0.880751 = 0; r_{26} = 0.880751 - 0.84652 = 0.034231; r_{36} = 0.880751 - 0.880751 = 0.$$

7. Розраховуємо сьомий стовпчик матриці ризиків:

$$r_{17} = 0.891598 - 0.891598 = 0; r_{27} = 0.891598 - 0.605489 = 0.286109; r_{37} = 0.891598 - 0.891598 = 0.$$

8. Розраховуємо восьмий стовпчик матриці ризиків:

$$r_{18} = 0.82534 - 0.82534 = 0; r_{28} = 0.82534 - 0.76492 = 0.06042; r_{38} = 0.82534 - 0.82534 = 0.$$

Таблиця 3.5 – Матриця для розрахунку за критерієм Севіджа

A _i	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8
A1	0,05000	0,00275	0,00000	0,00014	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
A2	0,20000	0,00000	0,00373	0,00000	0,00634	0,03423	0,28611	0,06042
A3	0,00000	0,02188	0,00003	0,00014	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

Результати розрахунків наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати розрахунків за критерієм Севіджа

A _i	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	max(a _{ij})
A1	0,05000	0,00275	0	0,00014	0	0,00000	0,00000	0,00000	0,05000
A2	0,20000	0	0,00373	0,00000	0,00634	0,03423	0,28611	0,06042	0,28611
A3	0,00000	0,02188	0,00003	0,00014	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,02188

Вибираємо з (0.05; 0.286109; 0.02188) мінімальний елемент $\min = 0,02188$. Отже, за критерієм Севіджа приймається стратегія А3.

Критерій Гурвіца є критерієм песимізму-оптимізму. За оптимальну приймається та стратегія, для якої виконується співвідношення

$$\max(s_i), \text{ де } s_i = y \min(a_{ij}) + (1 - y) \max(a_{ij}).$$

При $y = 1$ отримуємо критерій Вальде, при $y = 0$ отримуємо оптимістичний критерій (максимакс).

Критерій Гурвіца враховує можливість як найгіршої, так і найкращої для людини поведінки природи. Значення y вибирається залежно від наслідків помилкових рішень. Чим гірше наслідки помилкових рішень, тим більше бажання застрахуватися від помилок, тим y ближче до 1 (таблиця 3.7).

Розраховуємо s_i :

$$s_1 = 0.5*0.82534+(1-0.5)*0.9 = 0.86267;$$

$$s_2 = 0.5*0.605489+(1-0.5)*0.88965 = 0.7475695;$$

$$s_3 = 0.5*0.82534+(1-0.5)*0.95 = 0.88767.$$

Таблиця 3.7 – Результати розрахунків за критерієм Гурвіца

Ai	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	min(aij)	max(aij)	$\frac{y \min(aij) + (1-y)\max(aij)}{y}$
A1	0,90	0,89	0,88	0,83	0,86	0,88	0,89	0,83	0,83	0,90	0,86
A2	0,75	0,89	0,88	0,83	0,86	0,85	0,61	0,76	0,61	0,89	0,75
A3	0,95	0,87	0,88	0,83	0,86	0,88	0,89	0,83	0,83	0,95	0,89

Вибираємо з (0.86267; 0.7475695; 0.88767) максимальний елемент $\max=0.89$. За критерієм Гурвіца приймається стратегія А3.

Отже, у результаті рішення статистичної гри за різними критеріями частіше за інших вибрана стратегія А3 і, як наслідок, резерви у нитках графіка за кожною дільницею залізничного полігону рекомендовані для застосування в нормативному ГРП.

Відповідно до вищенаведених досліджень формалізовано процес розповсюдження затримок поїздів на розгалужених залізничних полігонах за допомогою модифікованих епідеміологічних SIR-моделей. Це дало змогу пришвидшити точність складних і тривалих розрахунків поширення затримок поїздів з урахуванням впливу «мережевого ефекту». Для підвищення точності розроблено математичну модель на базі епідеміологічних моделей типу SIR, що враховують взаємовплив поїздів з різним пріоритетом у потоці. Для послідовного розв'язання SIR-моделей, що відповідають взаємопов'язаним дільницям мережі, запропоновано перетворювати граф мережі на спрямоване дерево, коренем якого є станція або декілька станцій виникнення затримки.

Проведені експериментальні дослідження поширення затримок поїздів на залізничному полігоні з урахуванням взаємовпливу різних категорій поїздів у потоці та закладених резервів часу на відновлення руху дали змогу кількісно оцінити поширення затримки п'яти вантажних і чотирьох пасажирських поїздів. Доведено, що в умовах виникнення одночасної первинної затримки в пасажирських і вантажних поїздів на початку руху по станції А найбільш негативно вона впливає на приміські поїзди на всіх ділянках досліджуваного полігона. Результати моделювання підтвердили адекватність отриманих розв'язків. Запропонований метод моделювання розповсюдження затримок поїздів може використовуватись як інструмент для дослідження впливу закладених величин резервів часу в нормативних графіках руху поїздів для їхнього удосконалення.

Для визначення раціональних резервів часу в нитках графіка запропоновано виконувати вибір альтернативних стратегій закладених резервів, спираючись на оцінювання надійності ГРП при розрахуванні коефіцієнта готовності для кожної ділянки полігона. Вибір найбільш прийнятної стратегії закладення резервів реалізовано у вигляді статистичної гри за критеріями вибору – Вальда, Байєса, Севіджа, Гурвіца. Це дає змогу вибирати зважений варіант закладення резервів у нормативному ГРП.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ ВИМОГ ЩОДО ФОРМУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПІДСИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЗЕРВІВ ЧАСУ В НИТКАХ ГРАФІКА ТА ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

4.1. Дослідження функцій чинних автоматизованих систем АТ «Укрзалізниця» для розроблення вимог щодо формування автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу в графіку руху поїздів

Процес складання графіка руху поїздів в АТ «Укрзалізниця» потребує ув'язування багатьох технологічних етапів підготовки вхідних даних та узгодження розроблених ниток графіка між причетними підрозділами, відправниками і одержувачами вантажів тощо. При складанні ГРП задіяно багато рівнів керування, що потребує об'єднання прийнятих рішень щодо розроблення ниток графіка руху в єдиному інформаційному середовищі. Для формування вимог щодо формування автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу в графіку руху поїздів важливо провести аналіз функцій чинних автоматизованих систем АТ «Укрзалізниця» і їхньої можливості взаємодії між собою.

В АТ «Укрзалізниця» діє система централізованого складання графіка руху поїздів (СЦСГРП) [44], до якої входять департаменти, ГІОЦ Укрзалізниці, Головний і регіональні центри керування перевезеннями, регіональні філії та їхні підрозділи, науково-дослідні та навчальні інститути та інші організації залізничного транспорту, що беруть участь у підготовці даних і розробленні графіка руху поїздів. На сьогодні ядром СЦСГРП є програмний продукт «АРМ інженера-графіста», що складається з комплексу програм автоматизованого розроблення графіка руху поїздів (КПАР ГРП), які дають змогу вирішувати такі завдання:

- вести аналіз і коректувати вхідну інформацію для розроблення графіка руху поїздів;
- розробляти і коректувати графік у режимі пониткового прокладання;
- формувати, коректувати і креслити аркуші графіків встановленої форми, диспетчерські аркуші, кальки;
- розраховувати показники графіка;
- формувати і друкувати вихідні документи і розраховувати показники по довільних ділянках.

Програма «АРМ інженера-графіста» (рисунок 4.1) була розроблена в 1999 році та не має функцій, необхідних для ефективного складання ГРП, зокрема автоматичної побудови нитки графіка, розрахування резервів часу в нитках графіка на мережі, моделювання затримок, відсутній зв'язок з АСК ВП УЗ та АСК ПП УЗ [61] тощо.

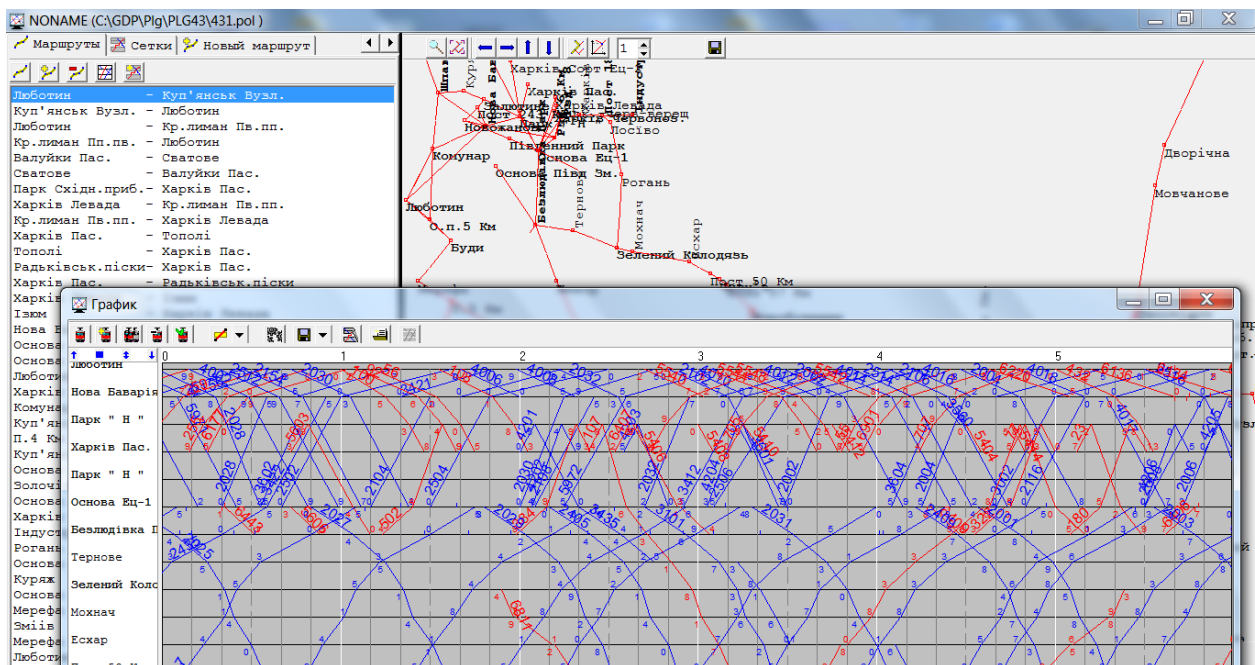


Рисунок 4.1 – Інтерфейс «АРМ інженера-графіста»

У межах складання ГРП [44], зокрема розроблення нитки графіка, важливим етапом є визначення перегінного час ходу, розгону і сповільнення поїздів різних категорій. Це виконується тяговими розрахунками згідно з чинними «Правилами виконання тягових розрахунків для поїзної роботи» [62] виходячи з норми ваги (уніфікованої або паралельної) і з урахуванням усієї сукупності постійних і тривалодіївих попереджень про обмеження швидкості на перегонах і станціях. Для проведення тягово-енергетичних розрахунків і визначення перегінних часів ходу поїздів, міжпоїзних і міжстанційних інтервалів руху в АТ «Укрзалізниця» діє програмний продукт ПК «Динамік». Сам ПК «Динамік» інтегрований у межах програмного комплексу «Графоаналітичний редактор схем залізниць (ПП ГАС Railway)», призначеного для побудови графоаналітичних схем залізниць, і має інформаційну базу даних технічних параметрів залізничної мережі з одночасною побудовою графічної схеми мережі.

Основним джерелом інформації щодо постійних і тривалодіїєвих попереджень про обмеження швидкості на перегонах і станціях є Автоматизована система видачі та відміни попереджень на поїзди (АСВВП), що має актуальну базу чинних попереджень різних видів і призначена для видачі та відміни попереджень на лінійних підрозділах залізничного транспорту, формування довідок, які відображують дані про обмеження швидкості руху поїздів. Однак інформаційний зв'язок між АСВВП та ПП ГАС Railway відсутній. Відсутній також зв'язок з важливими для складання ГРП базами даних в АРМ ТРА - Автоматизоване робоче місце інженера з ведення технічно-розпорядчих актів станцій («АРМ інженера з ТРА»), де зберігається інформація технічно-розпорядчих актів (ТРА) станцій, зокрема продольні профілі колій і перегонів. Такі дані є важливими при складанні ГРП.

У межах оперативного керування перевезеннями в АТ «Укрзалізниця» функціонує Єдина Автоматизована система керування вантажними перевезеннями (АСК ВП УЗ-Є), що поєднує множину моделей перевізного процесу та забезпечує єдність інформаційного середовища. Система АСК ВП УЗ-Є складається з поїзної, вагонної, контейнерної, локомотивної моделей. У межах єдиного середовища функціонують різні автоматизовані системи та підсистеми, що використовують спільне сховище даних. Це означає, що інформація про будь-які події в процесі перевезень постійно накопичується, утворюючи динамічні моделі процесу перевезень і відображуючи його історію. Система АСК ВП УЗ-Є має відкриту архітектуру (рисунок 4.2). Завдяки цьому можуть бути додані будь-які нові інформаційні підсистеми.

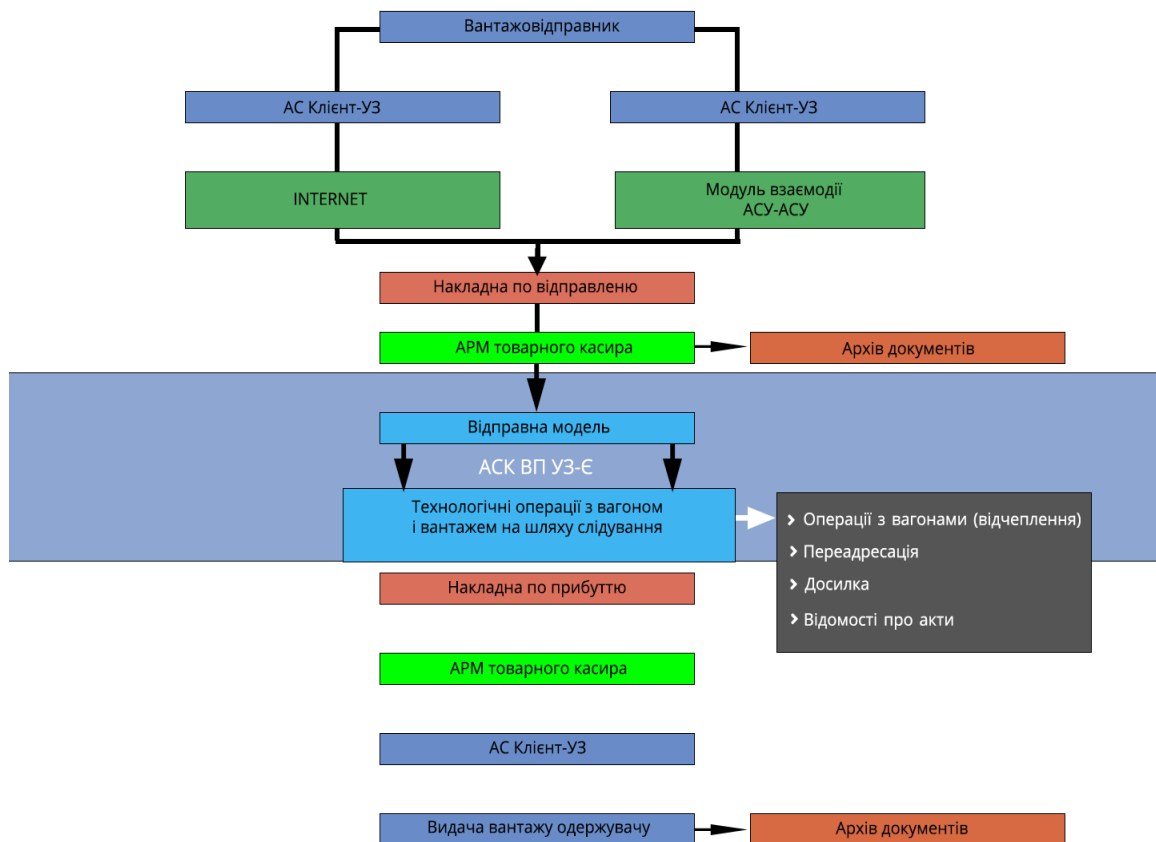


Рисунок 4.2 – Архітектура автоматизованої системи АСК ВП УЗ-Є

Ураховуючи, що при складанні ГРП важливим етапом є замовлення та узгодження ниток графіка між відправником вантажу та АТ «Укрзалізниця», можна розглядати як цифрову платформу взаємодії вже чинну автоматизовану систему АС МЕСПЛАН. Система розроблена для автоматизації процесу введення замовлень на перевезення і подальшого формування планів згідно з «Правилами планування перевезень вантажів» [72]. Для забезпечення взаємодії з вантажовласниками у процесі роботи з АС МЕСПЛАН, оформлення, обробки електронних перевізних документів діє автоматизована система АС Клієнт УЗ. Функції АС Клієнт УЗ:

- забезпечення роботи користувачів з перевізними документами при відправленні та одержанні вантажів;

- забезпечення взаємодії автоматизованих систем УЗ з автоматизованими системами відправників і одержувачів вантажів у процесі формування та обробки перевізних документів [64].

Проведений раніше аналіз показав, що АРМ ТРА, системи АС МЕСПЛАН, АС Клієнт УЗ, АСВВП у взаємодії з базами даних АСКВП УЗ-Є не мають інформаційної взаємодії з програмними продуктами в межах системи централізованого складання графіка руху поїздів – ПП ГАС Railway, ПК «Динамік» та «АРМ інженера-графіста». Відсутні функції автоматизації визначення раціональних резервів часу в ГРП. Для розроблення вимог щодо автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу в графіку руху поїздів важливо дослідити процедури планування та розроблення ниток графіка при наданні послуг з організації перевезень вантажів на особливих умовах – за узгодженим розкладом руху маршрутних поїздів (РРМП) і при розробленні ниток для доступу приватних локомотивів до залізничної інфраструктури АТ «Укрзалізниця».

4.2. Дослідження процедур планування та розроблення ниток графіка при наданні послуг з розкладом руху маршрутних поїздів і приватних локомотивів

Вихідні дані для розроблення спеціалізованих ниток за РРМП визначають так само, як і для звичайного графіка у відповідності з Інструкцією з складання ГРП [44]. Єдиною важливою особливістю є визначення кількості ниток графіка вантажних поїздів, встановлення резервів часу та час їхнього відправлення за узгодженими заявками. Процедура розроблення нитки графіка ув'язана з системою планування перевезень, що відрізняє цей підхід від стандартної практики складання ГРП, коли момент відправлення вибирають на основі статистики використання ниток за попередні періоди або виходячи з правил складання ГРП. Можливість оформлення замовлень на перевезення вантажів за узгодженим розкладом руху маршрутних поїздів реалізовано в електронному вигляді з накладенням кваліфікованого електронного підпису, що дало змогу пришвидшити процес оформлення замовлень.

Внесення замовлень здійснюється в середовищі АС Клієнт УЗ через модуль «Планування – Календар планування маршрутів». Інструкція користувача розміщена в цьому ж розділі. Приймання замовлень на перевезення у вагонах перевізника триває до 10 числа поточного місяця на наступний плановий місяць (рисунок 4.3).

У випадку порушення часу прибуття маршрутного поїзда перевізник сплачує штраф шляхом перерахування плати, нарахованої при прийманні вантажу до перевезення, у розмірі 1 %, але разом не більше 20 % провізної плати – інфраструктурної складової тарифу, нарахованого в такому перевезенні (без урахування її підвищення) за кожну повну годину порушення термінів починаючи з п'ятої години запізнення. Сплата штрафу перевізником відображується перевізником в особовому рахунку замовника як попередня оплата за надання послуг.

відправник (Замовник)

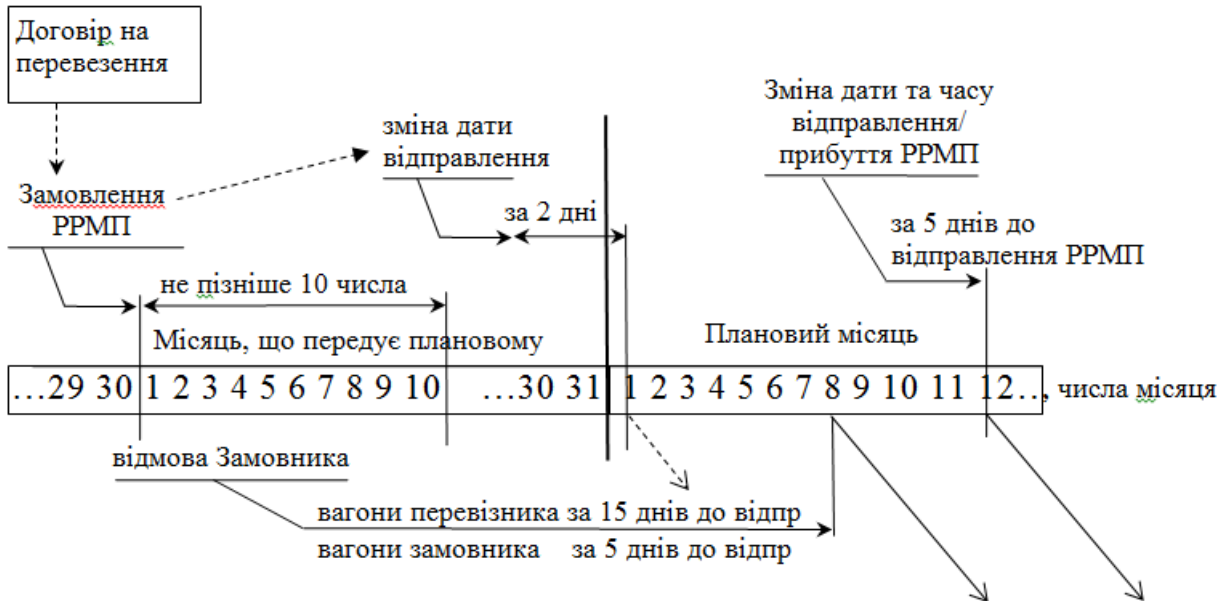


Рисунок 4.3 – Схема планування при наданні послуг з організації перевезень вантажів на особливих умовах – за узгодженим розкладом руху маршрутних поїздів

Розроблення спеціалізованих ниток РРМП може здійснюватись за процедурою складання нової наскрізної нитки у випадку наявності вільних полів у ГРП. Однак найчастіше складання спеціалізованих ниток для РРМП проводиться на основі аналізу існуючих неспеціалізованих ниток у нормативному ГРП та ув'язування дільничних або наскрізних ниток на всьому маршруті руху від станції навантаження до станції вивантаження.

Процедура складання графіка для перевезення вантажів за розкладом руху вантажних поїздів з приватними локомотивами (РПЛ) заснована на досвіді роботи з РРМП з єдиною різницею, що горизонт планування розширюється до одного року [70, 71]. На рисунку 4.4 наведено схему планування розподілу (формування) графіка РПЛ.

Окрім річного планування робочого графіка руху поїздів, проводиться планування на календарний місяць – щомісячно; позапланові перевезення – за п'ять днів; перевезення ad hoc – за добу; реалізується оперативний

план роботи до 15-00 кожної доби. У межах кожного з періодів планування при складанні нитки графіка та оцінюванні показників ГРП постає завдання встановлення резервів у нитках графіка. Як показав аналіз схем планування на рисунках 4.3, 4.4, у багатьох етапах узгодження ниток графіка обмежений час у деяких випадках до трьох днів. За таких умов експертно визначити резерви досить складно, а на довготривалі креслення ГРП з різними варіантами резервів часу та взаємоув'язуванням ниток на полігоні нема ресурсів і часу. Ураховуючи, що дієвих процедур встановлення резервів нема, важливо в межах кожного з етапів застосовувати удосконалений метод визначення резервів часу в нитках графіка на основі моделювання розповсюдження затримок поїздів (розділи 2, 3).

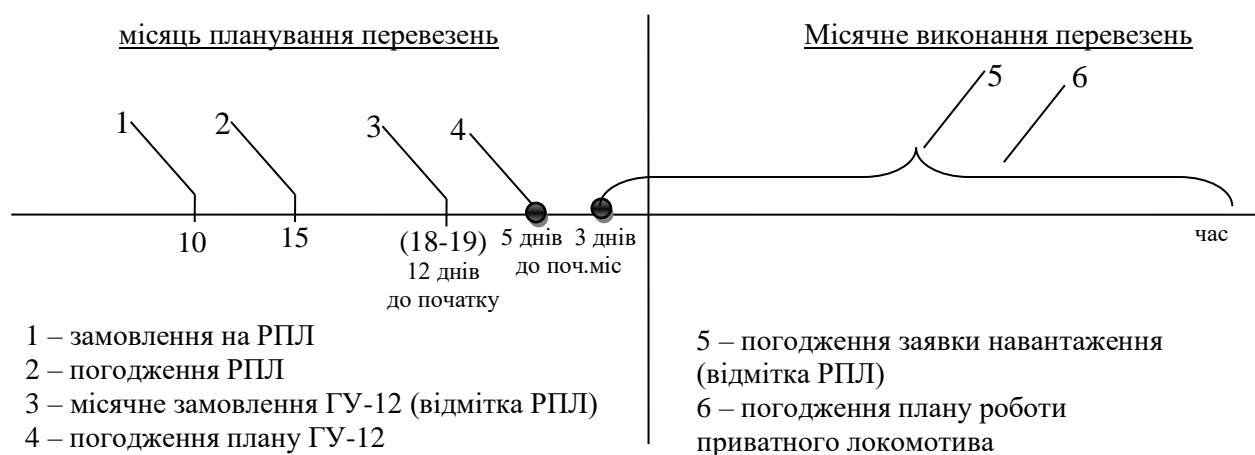


Рисунок 4.4 – Схема планування розподілу (формування) графіка для перевезення вантажів за розкладом руху вантажних поїздів з приватними локомотивами (РПЛ)

4.3. Формування функцій і вимог щодо автоматизованої підсистеми визначення величин резервів часу в нитках графіка

Відповідно до існуючого інформаційного забезпечення, чинних програмних додатків АТ «Укрзалізниця» і процедур складання ГРП, що передбачається реалізовувати при запланованій реформі залізничного транспорту України, у науковій роботі запропоновано удосконалити комплекс функціональних задач системи АСК ВП УЗ-Є на основі інтеграції інформаційних потоків з розробленою системою підтримки прийняття рішень (СППР) на «АРМ інженера-технолога» з розроблення ГРП для визначення величин резервів часу в нитках графіка нормативного ГРП до введення їх у дію [49].

У межах існуючої системи централізованого складання графіка руху поїздів запропоновано розробити автоматизовану підсистему на основі сформованих у науковій роботі математичних моделей, методу моделювання розповсюдження затримок поїздів і процедури вибору раціональних резервів часу в нитках графіка. Важливою вимогою цієї підсистеми має бути сумісність з ядром СЦСГР – програмним комплексом для автоматизованого розрахунку ГРП («АРМ інженера-графіста») і ПП ГАС Railway, ПК «Динамік». Через наявність лише застарілих функцій в «АРМ інженера-графіста» бажано розробити більш сучасний програмний комплекс автоматизації складання ГРП на базі дієвої ПП ГАС Railway, де запропонована автоматизована підсистема визначення раціональних резервів часу в нитках графіка буде складовою єдиного комплексу. Схема функціональної взаємодії в єдиному інформаційному середовищі автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу в нитках графіка наведена на рисунку 4.5.

Для реалізації СППР необхідно врахувати етапи розроблення і прийняття рішень у процесі планування перевезень вантажів за РРМП і розкладом руху вантажних поїздів з приватними локомотивами (РПЛ).

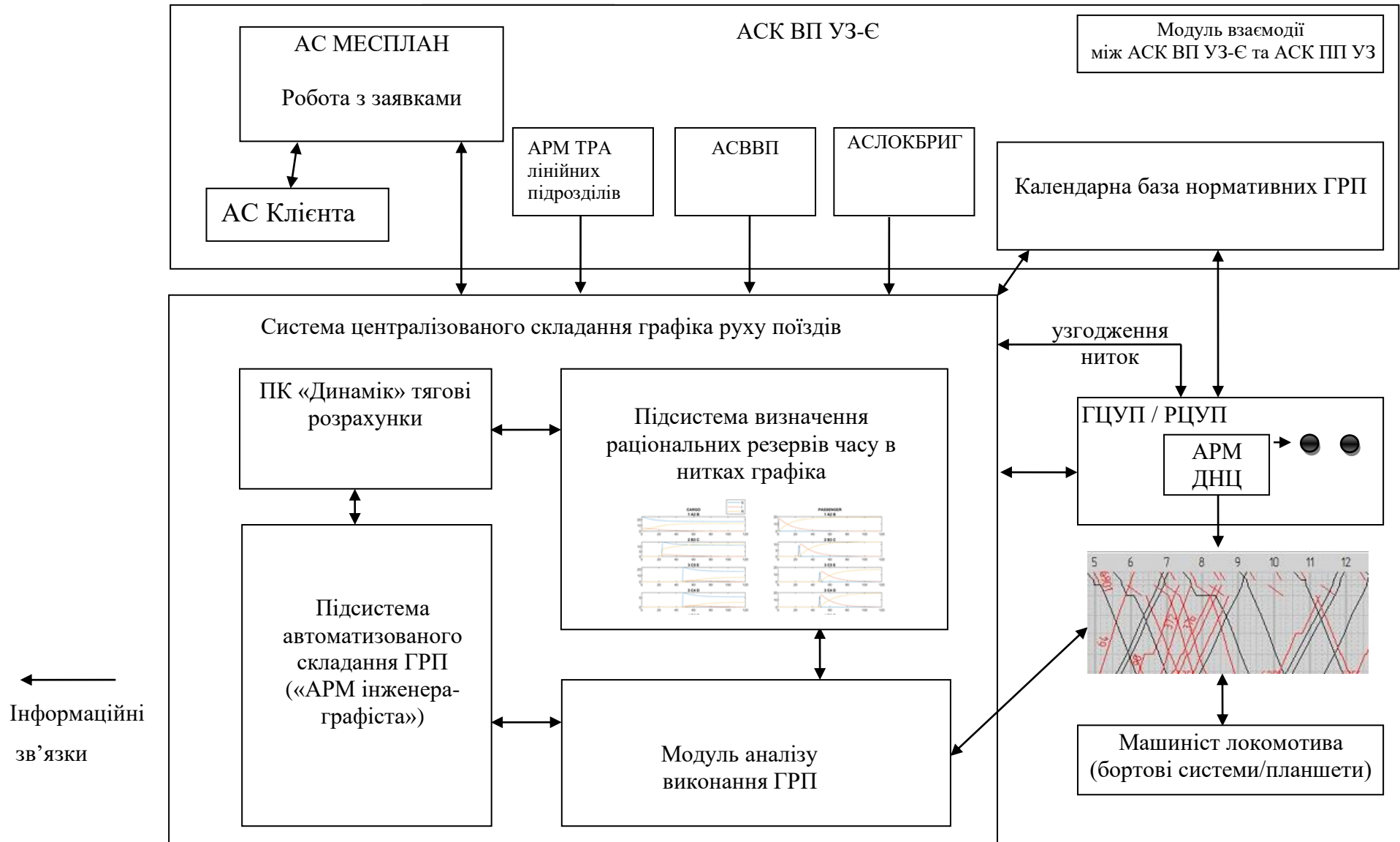


Рисунок 4.5 – Схема функціональної взаємодії в єдиному інформаційному середовищі автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу в нитках графіка

У межах СЦСГР на «АРМ інженера-технолога» зі складання ГРП має бути можливість взаємодії з календарною базою нормативних ГРП та іншими АС і підсистемами АСК ВП УЗ, а через спеціальний модуль взаємодії й з АСК ПП УЗ. Ураховуючи, що в межах етапів планування та складання нормативного ГРП набуває важливого значення узгодження ниток графіка з відправниками вантажів і пасажирськими компаніями, у майбутньому, після реалізації реформування й компаніями-перевізниками в СЦСГР на СППР інженерів-технологів з розроблення ГРП, має бути взаємозв'язок з АС МЕСПЛАН, поєднаним з АС Клієнт УЗ.

Розроблені нитки графіка з урахуванням визначених резервів часу в запропонованій автоматизованій підсистемі мають узгоджуватися через інформаційні канали та єдиний простір СППР з фахівцями Головного та Регіональних центрів керування перевезеннями. Після узгодження в межах інтерфейсу СППР на «АРМ інженера-технолога» зі складання графіка має бути функція завантаження нитки ГРП або всього листа ГРП до календарної бази ГРП. Для можливості здійснення перевезень за ГРП диспетчерський апарат через АРМ ДНЦ [69] або інші оперативні АРМ повинен мати можливість використовувати розроблені розклади в межах поточної роботи залізниці. Для забезпечення повного контура керування важливо автоматично передавати розклад прямування з урахуванням «нагону часу» при скороченні запізнь на бортові пристрої поїзних локомотивів на мережі або, у випадку відсутності, на планшети машиністів за досвідом залізниць SBB та інших.

Знайдені резерви в автоматизованій підсистемі [44] мають вивантажуватися для передавання в електронному вигляді або друкування в затверджених форматах для формування Додатка до графіка руху поїздів про скорочення запізнь поїздів (далі Додаток). Цей Додаток розробляється згідно з вимогами пункту 1.3 «Інструкції для обліку і аналізу виконання графіка руху пасажирських, приміських та вантажних

поїздів» ЦД-ЦЧУ/0024 перед введенням нового графіка, при переході на осінньо-зимовий графік, а також після виконання ремонтних робіт, що сприяли відміні обмежень швидкості. У цьому Додатку для кожного поїзда визначається резерв часу, який виникає при прямуванні «ниткою» графіка поїзда конкретної довжини та маси в умовах, що прогножуються, тобто влітку, взимку, по днях.

Для спрощення процесу розроблення незалежного програмного продукту можливе використання технології написання комплексу математичних моделей у середовищі MATLAB з наступним конвертуванням до незалежно виконуваної програмної реалізації.

Запропоновано реалізувати автоматизовану підсистему в межах середовища ПП ГАС Railway [68]. На рисунку 4.6 наведено ескіз графічного інтерфейсу СППР автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу в нитках графіків.

Отже, проведений аналіз функцій чинних автоматизованих систем АТ «Укрзалізниця» і їхніх можливостей взаємодії між собою показав, що АРМ ТРА, системи АС МЕСПЛАН, АС Клієнт УЗ, АСВВП у взаємодії з базами даних АСКВП УЗ-Є не мають інформаційної взаємодії з програмними продуктами в межах системи централізованого складання графіка руху поїздів – ПП ГАС Railway, ПК «Динамік» і «АРМ інженера-графіста». Відсутні функції автоматизації визначення раціональних резервів часу у ГРП. Однак досвід багатьох залізниць ЄС показав, що важливо створювати всі програмні додатки для складання ГРП, зокрема визначення раціональних резервів часу та моделювання надійності ГРП в межах єдиного інформаційного середовища для прискорення розрахунків та узгодження.

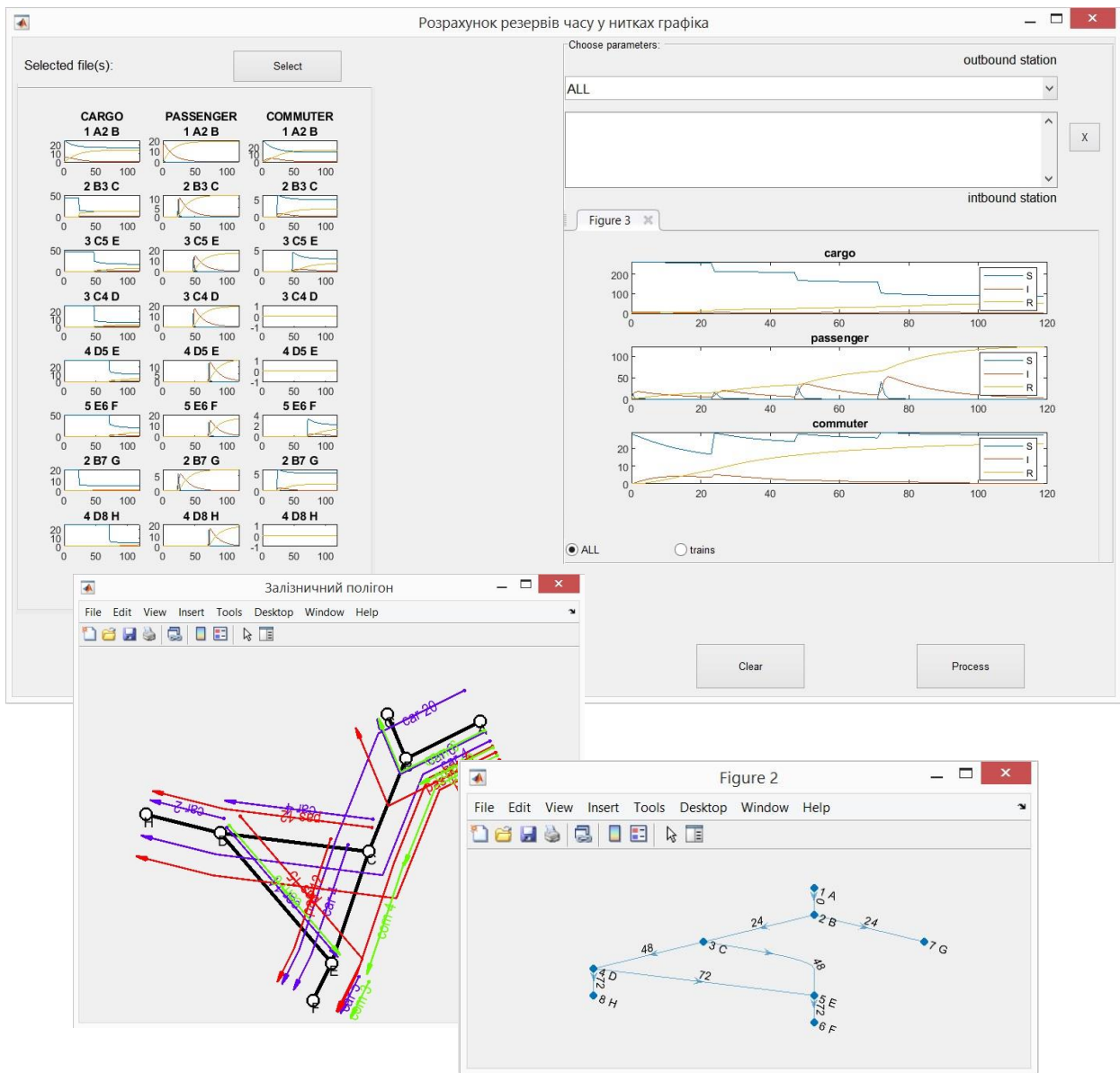


Рисунок 4.6 – Ескіз графічного інтерфейсу СППР автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу в нитках графіка в межах ПП ГАС Railway

Відповідно до існуючого інформаційного забезпечення, дієвих програмних додатків АТ «Укрзалізниця» і процедур складання ГРП, що передбачається реалізовувати при запланованій реформі залізничного транспорту України, у роботі запропоновано удосконалити комплекс функціональних задач системи АСК ВП УЗ-Є на основі інтеграції інформаційних потоків з розробленою системою підтримки прийняття

рішень (СППР) на «АРМ інженера-технолога» з розроблення ГРП для визначення величин резервів часу в нитках графіка нормативного ГРП до введення їх у дію. Для реалізації СППР рекомендовано врахувати етапи розроблення і прийняття рішень у процесі планування перевезень вантажів за РРМП і розкладом руху вантажних поїздів з приватними локомотивами (РПЛ).

Проведено дослідження процедур планування та розроблення ниток графіка при наданні послуг з організації перевезень вантажів на особливих умовах – за узгодженим розкладом руху маршрутних поїздів (РРМП) і при розробленні ниток для доступу приватних локомотивів до залізничної інфраструктури АТ «Укрзалізниця». Виявлено, що дієвих процедур встановлення резервів у нитках графіка нема. Рекомендовано реалізувати автоматизовану підсистему визначення резервів часу в нитках графіка та в межах кожного з етапів планування і розроблення ниток для РРМП та РПЛ застосовувати удосконалений метод визначення резервів часу в нитках графіка на основі моделювання розповсюдження затримок поїздів, запропонованого в розділах 2 та 3 цього дослідження.

Для удосконалення існуючої системи централізованого складання графіка руху поїздів запропоновано схему функціональної взаємодії в єдиному інформаційному середовищі автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу в нитках графіка. Це дасть змогу комплексно автоматизувати процес розподілу пропускної спроможності з урахуванням розроблення більш надійних ниток графіка.

ВИСНОВКИ

У науковій роботі удосконалено метод визначення резервів часу в нитках графіка з використанням моделювання розповсюдження затримок поїздів. Це дасть змогу підвищити швидкість і якість складання нормативного графіка руху поїздів для залізничних систем без дотримання розкладу відправлення вантажних поїздів, зокрема залізниць України, за рахунок автоматизації складного процесу пошуку раціональних величин компенсаційного часу в нитках поїздів різних категорій на полігонах залізничної мережі і, як наслідок, підвищити рівень виконання термінів доставки вантажів, пунктуальність і надійність нормативних графіків руху поїздів. У роботі отримано результати і зроблено такі основні висновки.

Аналіз умов функціонування залізничного транспорту України при чинній системі закладення резервів часу в графіку руху поїздів виявив погіршення експлуатаційних показників АТ «Укрзалізниця». При стабільному тренді падіння вантажної бази зростає час знаходження вагона в русі, що є важливим елементом середнього обороту вантажного вагона. Спостерігається зростання тривалості знаходження вагонів на проміжних станціях і в поїздах при русі на залізницях України, збільшення кількості затримок. Виявлено, що затримки в мережі згубно впливають на терміни доставки вантажів. Це свідчить про значні проблеми в системі планування руху поїздопотоків і відсутність достатнього рівня надійності ГРП.

Для формалізації процесу розповсюдження затримок поїздів на залізничній дільниці розроблено модифіковану математичну епідеміологічну SIR-модель, що дає змогу чисельно оцінити швидкість впливу поїздів різних категорій і величини їхніх резервів компенсації часу при русі на надійність нормативного графіка руху поїздів. Цей макрорівневий підхід до моделювання розповсюдження затримок поїздів передбачає застосування методу машинного навчання для здобуття знань з

даних реальних затримок поїздів на дільниці при пошуку параметрів диференціальних рівнянь SIR-моделі та проведення моделювання розповсюдження затримки з різними швидкостями відновлення руху.

Для пошуку раціональних резервів часу на відновлення руху поїздів різних категорій залежно від кількості затриманих поїздів у графіку руху розроблено метод на основі моделювання розповсюдження затримок поїздів на розгалужених залізничних полігонах. Цей метод дає змогу врахувати поширення первинної затримки у просторі і часі за рахунок подання топології залізничної мережі у вигляді неорієнтованого графа з прив'язкою до ребра графа математичної системи диференціальних рівнянь SIR-моделі, що пришвидшить точність складних і тривалих розрахунків поширення затримок поїздів з урахуванням впливу «мережевого ефекту».

Сформовано вимоги до автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу в нитках графіка для підвищення швидкості та якості складання нормативного графіка руху поїздів на залізниці України в межах інформаційного середовища системи АСК ВП УЗ-Є і дієвих програмних продуктів з розроблення ГРП. Виявлено, що відсутні дієві процедури для встановлення резервів у нитках графіка при плануванні перевезень за розкладом руху маршрутних поїздів (РРМП) і розробленні ниток для доступу приватних локомотивів до залізничної інфраструктури АТ «Укрзалізниця», відповідно до чого розроблені рекомендації застосування удосконаленого методу визначення резервів часу в нитках графіка на основі моделювання розповсюдження затримок поїздів. Запропоновано удосконалити комплекс функціональних задач системи АСК ВП УЗ-Є на основі інтеграції інформаційних потоків з розробленою системою підтримки прийняття рішень (СППР) на «АРМ інженера-технолога» з розроблення ГРП для визначення величин резервів часу в нитках графіка нормативного ГРП до введення їх у дію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Транспортна стратегія України на період до 2030 р.: розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. N 430-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text> (дата звернення: 12.09.2022).

2. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським Співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони, ратифіковано із Законом <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1678-18/paran2> - n2 № 1678-VII від 16.09.2014 р. URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/984_011 (дата звернення 20.08.2022).

3. План заходів з виконання Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони: затв. постановою Кабінету Міністрів України від 25 жовтня 2017 р. № 1106. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1106-2017-%D0%BF#n10> (дата звернення 01.10.2020).

4. Директива 95/18/ЄС «Щодо залізничних підприємств». URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/994_952 (дата звернення 15.06.2020).

5. COUNCIL DIRECTIVE 95/19/EC of 19 June 1995 on the allocation of railway infrastructure capacity and the charging of infrastructure fees. *Official Journal of the European Communities* (L 143). 1995. 115 p.

6. Directive 2001/12/EC of the European Parliament and of the Council of 26 February 2001 amending Council Directive 91/440/EEC on the development of the Community's railways. THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. *Official Journal of the European Communities* (OJ L 075/1). 2001. 25 p.

7. Directive 2001/13/EC of the European Parliament and of the Council of 26 February 2001 amending Council Directive 95/18/EC on the licensing of railway undertakings. THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. *Official Journal of the European Communities* (OJ L 75/26). 2001. 3 p.

8. Directive 2001/14/EC of the European Parliament and of the Council of 26 February 2001 on the allocation of railway infrastructure capacity and the levying of charges for the use of railway infrastructure and safety certification. THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. *Official Journal of the European Communities* (OJ L 75/29). 2001. 18 p.

9. Інтегрований річний звіт АТ «Укрзалізниця». Київ, 2019. 234 с.

10. Кабмін очікує від «Укрзалізниці» в 2020 році прибуток 69 тис. грн. *Фінанси та економіка*. URL: <http://finbalance.com.ua/news/ukrzaliznitsya-planu-v-2020-rotsi-otrimati-pributok-69-tis-hrn> (дата звернення 20.09.2020).

11. Транспорт України 2019. Державна служба статистики України. Київ, 2020. 115 с. URL: https://ukrstat.org/uk/druk/publicat/kat_u/2020/zb/10/zb_trans_19.pdf (дата звернення 20.09.2022).

12. Кулак Олексій. У 2019 перевезення контейнерів Укрзалізницею зросло на 14,64 %. *Rail.insider*. URL: <https://www.railinsider.com.ua/v-2019-perevezennya-kontejneriv-ukrzaliznyczeu-zroslo-na-1464/> (дата звернення 20.09.2022).

13. Звіт про результати дослідження ринку перевезення вантажів залізничним транспортом за 2017-2018 роки. Антимонопольний комітет України. 2019 р. URL: https://amcu.gov.ua/storage/app/sites/1/imported_content/5d690ffe9bad7.pdf (дата звернення 21.09.2022).

14. Dick C. T., Darkhan M. Transitioning from flexible to structured heavy haul operations to expand the capacity of single-track shared corridors in

North America. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit*. 233(6). 2019. P. 629-639. doi:10.1177/0954409718804427.

15. Прохорченко А. В. Зміна парадигми: PSR або концепція залізниці «на час». Центр транспортних стратегій. URL: https://cfts.org.ua/blogs/zmina_paradigmi_psr_abo_kontseptsiya_zalznitsi_na_chas_457 (дата звернення 01.11.2022).

16. Прохорченко Г. О., Щербацька А. І., Ткачук М. М. Дослідження впливу величини резерву часу на надійність графіка руху швидкісних поїздів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. Вип. 169. С. 205-213.

17. Peterson Anders, LiU Deliverable D 3.1 Analysis of the gap between daily timetable and operational traffic. FR8RAIL II. 2018. URL: <http://liu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1391876&dswid=-72> (дата звернення 02.11.2022).

18. Dirnberger J. R., Barkan Christopher P. L. Lean Railroading for Improving Railroad Classification Terminal Performance. Bottleneck Management Methods. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1995. *Transportation Research Board of the National Academies*, Washington, D. C. 2007. P. 52–61. DOI: 10.3141/1995-07.

19. Fraga-Lamas P., Fernández-Caramés T., Castedo L. Towards the Internet of Smart Trains: A Review on Industrial IoT-Connected Railways. *Sensors*. 2017. 17. doi: 10.3390/s17061457.

20. Panchenko S., Prokhorchenko A., Dekarchuk O., Gurin D., Mkrtychian D., Matsiuk V. Development of a method for studying the impact of the time reserve value on the reliability of the train schedule based on the epidemiological SIR model. *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 1002. 012016. doi:10.1088/1757-899X/1002/1/012016.

21. UIC 451-1 OR. Timetable recovery margins to guarantee timekeeping – *Recovery margins. International Union of Railways, France, 4e édition.* Version traduite. List of recent publications. 2000. 15 p.
22. Wen C., Huang P., Li Z., Lessan J., Fu L., Jiang C. & Xu X. (2019). Train Dispatching Management With Data-Driven Approaches: A Comprehensive Review and Appraisal. *A Comprehensive Review and Appraisal IEEE Access*, 7. 114547-114571. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2935106>.
23. Oneto L., Fumeo E., Clerico G., Canepa R., Papa F., Dambra C. et al. Dynamic delay predictions for large-scale railway networks: Deep and shallow extreme learning machines tuned via thresholdout. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2017. Vol. 47(10). P. 2754-2767.
24. Nilsson R., Henning K. Predictions of train delays using machine learning. EXAMENSARBETE INOM DATATEKNIK, GRUNDNIVÅ, 15 HP STOCKHOLM. KTN. 2018. 52 p. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1217917/FULLTEXT01.pdf> (last accessed: 10 October 2019).
25. Landex A. Network Effects In Railways. *WIT Transactions on The Built Environment*. 2012. 127. 391-401.
26. Прохорченко А. В., Гурін Д. О., Лагута М. І. Удосконалення процедури пошуку раціональних резервів часу на відновлення руху поїздів різних категорій. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2020. Вип. 169. С. 205-213.
27. Гурін Д. О. Дослідження впливу величини резерву часу на надійність графіка руху поїздів на основі епідеміологічної SIR-моделі. *33-тя Міжна. наук.-практ. конф. «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*: тези стендових доповідей та виступів учасників конференції (м. Харків, 30 жовтня 2020 р.). *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті* (додаток). 2020. С. 56.

28. Гурін Д. О. Моделювання розповсюдження затримок поїздів в залізничних мережах без дотримання розкладу руху вантажних поїздів. *VII Міжнар. наук.-техн. конф. «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту»*: матеріали конференції (м. Кременчук, 11-13 листопада 2020 р.). Кременчук: КрНУ, 2020. С. 149-150.

29. Прохорченко А. В., Гурін Д. О., Щербина М. Є. Розробка методу моделювання розповсюдження затримок поїздів в залізничних мережах. *IX наук. конф. «Наукові підсумки 2020 року»*: збірка наукових праць (м. Харків, 29 грудня 2020 р.). Харків: Технологічний Центр, 2020. С. 56. e-ISBN 978-617-7319-29-9.

30. Правила технічної експлуатації залізниць України: затв. наказом Міністерства транспорту України від 20.12.1996 р., № 411, зареєстр. у Мін'юсті 25.02.1997 за № 50/1854 (зі змінами та доповненнями). Київ: Транспорт України, 2002, 132 с.

31. Інструкція з руху поїздів і маневрової роботи на метрополітенах України: затв. наказом Міністерства транспорту України 04.11.2003 р. № 854 (у редакції наказу Міністерства інфраструктури України від 07.11.2017 р. № 373). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0591-04#Text> (дата звернення 01.12.2022).

32. Watson R. K. On an epidemic in a stratified population. *Journal of Applied Probability*. 1972. Vol. 9. P. 659-666.

33. Sivanandam S., Deepa S. Genetic Algorithm Implementation Using Matlab. In: *Introduction to Genetic Algorithms*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2008. 453 p.

34. Рутковская Д., Пилинський М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. Горячая линия-Телеком. 2006. 383 с.

35. Lee M. Decision Making Approaches for Complex Adaptive Systems in Built Environment. *International Journal of Management and Applied Research*. 2017. Vol. 4. No. 4. P. 222-232. Doi:10.18646/2056.44.17-017.
36. Loucks D. P., Beek E. van. Introduction to Optimization Models and Methods. *Water Resource Systems Planning and Management*. 2017. P. 93-177. Doi: 10.1007/978-3-319-44234-1_4.
37. Hunt B. R., Lipsman R. L., Osborn J. E., Rosenberg J. M. (2019) *Differential Equations with Matlab*, 3rd Edition 304. ISBN: 978-1-118-37680-5.
38. Boyce W., DiPrima R., Meade D. *Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems*. Wiley. 2017. 625 p.
39. Spanos Aris *Probability Theory and Statistical Inference: Econometric Modeling with Observational Data*. University of Cyprus. 1999. 844 p.
40. Кушнір Н. Б., Кузнецова Т. В. *Статистика: навч.-метод. посіб. для самостійного вивчення дисципліни*. Рівне: НУВГП, 2008. 205 с.
41. Butko T., Prokhorchenko A., Golovko T., Prokhorchenko G. Development of the method for modeling the propagation of delays in noncyclic train scheduling on the railroads with mixed traffic. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 1, Is. 3 (91). P. 30-39. doi: 10.15587/1729-4061.2018.123141.
42. Gurin D., Prokhorchenko A., Kravchenko M., Shapoval G. Development of a method for modelling delay propagation in railway networks using epidemiological SIR models. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 6, Is. 3 (108). P. 6-13. doi: 10.15587/1729-4061.2020.219285.
43. Харари Ф. *Теория графов*. Москва: Мир, 1973. 300 с.
44. Інструкція зі складання графіка руху поїздів на залізницях України: затв. наказом Укрзалізниці від 05.04.2002 р. № 170-Ц. Чинна від 01.04.2006. Київ: Транспорт України, 2003. 146 с.

45. Вергун О. Ф., Липовець Н. В., Боголій В. М. Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України ЦД-0036, затвердженої наказом Укрзалізниці від 14 березня 2001 р. № 143/Ц; навч.-метод. посіб. Київ: Транспорт України, 2002. 376 с.

46. Kermack W. O., McKendrick A. G. A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics. *Proc. Roy. Soc. Lond.* 1927. A 115. P. 700-721.

47. Rushton S. & Mautner A. J. The deterministic model of a simple epidemic for more than one community. *Biometrika.* 1955. 42. 126–132.

48. Правила технічної експлуатації залізниць України: затв. наказом Міністерства транспорту України від 20.12.1996 р. N 411, зареєстр. у Мін'юсті 25.02.1997 р. за № 50/1854 (зі змінами та доповненнями). Київ: Транспорт України, 2002. 132 с.

49. Гурін Д. О. Розробка вимог до автоматизованої системи прогнозування затримок поїздів в залізничній мережі України. *I Міжнар. наук.-техн. конф. «Інтелектуальні технології управління транспортними процесами».* Секція «Інтелектуальні технології управління транспортними процесами» : збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні технології управління транспортними процесами» (м. Харків, 17-18 листопада 2020 р.). Харків: ХНАДУ. 2020. С. 107.

50. Frankhuizen K., Li Y., & Liu H. Cascading Behavior of delay in Dutch Train Transportation: Network patterns and a model. 2018. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Cascading-Behavior-of-delay-in-Dutch-Train-%3A-and-a-Frankhuizen-Li/3a31366023f6626c5df52e6157aebddee8c54398>.

51. Zeng Z. & Li T. Analyzing Congestion Propagation on Urban Rail Transit Oversaturated Conditions: A Framework Based on SIR Epidemic Model. *Urban Rail Transit.* 2018. 4(3). 130–140.

52. Landex A. Network Effects In Railways. *WIT Transactions on The Built Environment*. 2012. 127. 391-401.
53. Ball F. (1985). Deterministic and stochastic epidemics with several kinds of susceptibles. *Advances in applied probability*. 1985. P. 1–22.
54. Watson R. K. On an epidemic in a stratified population *Journal of Applied Probability* 1972. Vol. 9. P. 659–666.
55. Valiente G. *Algorithms on Trees and Graphs*. 2002. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 489 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04921-1>.
56. Грунтов П. С. Эксплуатационная надежность станций. Москва: Транспорт, 1986. 247 с.
57. IEEE Std 493-1990: IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems. 1998. 464 p.
58. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Чинний від 01.01.1996. Київ: Держстандарт України, 1994. 33 с.
59. Нейман Дж. Фон, Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение: пер. с англ. /под ред. и с доб. Н. Н. Воробьева. Москва: Главная редакция физико-математической литературы из-ва «Наука», 1970. 707 с.
60. Morton D. Davis. *Game Theory: A Nontechnical Introduction*, Dover Publications. 1997. 252 p.
61. Жуковицький І. В., Скалозуб В. В., Устенко А. Б. Принципи побудови системи підтримки прийняття рішень і управління вантажними перевезеннями на основі аналітичних серверів АСК ВП УЗ. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2007. Вип. 17. С. 28-34.
62. Пейсахзон Б. Э. Вес и скорость грузовых поездов. Москва: Транспорт, 1957. 202 с.
63. Интеллектуальные транспортные системы железнодорожного транспорта (основы инновационных технологий): пособие / В. В. Скалозуб, В. П. Соловьев, И. В. Жуковицкий, К. В. Гончаров.

Днепропетровск: Изд-во Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2013. 207 с.

64. Ивченко Ю. М., Ивченко В. Г., Гондар А. Н. Интеграция сетевого оборудования АСК ВП УЗ и АСК ПП УЗ, подключение его к ЕМПД. *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. 2009. № 29. С. 143-146.

65. Rotoli F., Navajas Cawood E., Soria A. Capacity assessment of railway infrastructure: Tools, methodologies and policy relevance in the EU context. EUR 27835 EN. 2016. 62 p. doi:10.2791/037759.

66. Нестеренко Г. І., Пасічний О. М. Автоматизована розробка і побудова графіків руху поїздів. *Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2012. № 3. С. 87-93.

67. Гончаров М. М., Шпакович Р. А. Алгоритм побудови графіка руху поїздів *Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка»*. 2008. № 629. С. 146-152.

68. Інструкція користування програмним продуктом ГАС – «Railway». Державна адміністрація залізничного транспорту України. Львів, 2007. 135 с.

69. Мікропроцесорна диспетчерська централізація «КАСКАД»: навч. посіб. / Данько М. І., Мойсеєнко В. І., Рахматов В. З. та ін. Харків, 2005. 176 с.

70. Про реалізацію експериментального проекту щодо допуску приватних локомотивів до роботи окремими маршрутами на залізничних коліях загального користування: постанова Уряду, затв. постановою КМУ від 4 грудня 2019 р. № 1043. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1043-2019-%D0%BF#Text> (дата звернення 12.01.2023).

71. Тимчасове положення про порядок допуску приватних локомотивів до роботи окремими маршрутами на залізничних коліях загального користування, затверджено Міністерством інфраструктури України від 04.03.2020 р. наказ № 191. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0278-20#Text> (дата звернення 12.01.2023).

72. Правила перевезення вантажів: Наказ Міністерства транспорту України від 21 листопада 2000 р. № 644, зареєстр. в Міністерстві юстиції України 24 листопада 2000 р. за N 861/5082. URL: https://uz.gov.ua/cargo_transportation/legal_documents/terms_of_freight/ (дата звернення 12.10.2022).

Наукове видання

ГУРІН Дмитро Олегович

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ РЕЗЕРВІВ ЧАСУ
В НИТКАХ ГРАФІКА РУХУ ПОЇЗДІВ

Монографія

Відповідальний за випуск Гурін Д. О.

Редактор Ібрагімова Н. В.

Підписано до друку 24.05.2023 р. Формат паперу 60x84x16.
Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний
Умовн.-друк.арк. 5,75. Тираж . Замовлення №

Видавець та виготовлювач Український державний університет залізничного транспорту, 61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха,7. Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК No 6100 від 21.03.2018 р.