

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
Факультет транспорту і будівництва
Кафедра логістичного управління та безпеки руху на транспорті**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до дипломної кваліфікаційної роботи
освітньо-кваліфікаційного рівня магістр**

галузі знань 27 – «Транспорт»
спеціальності 275 – «Транспортні технології (залізничний транспорт)»

на тему: «Удосконалення методу визначення резервів часу у нитках графіку на основі моделювання розповсюдження затримок поїздів»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ОПЗТ-21зм
Черства В.С.



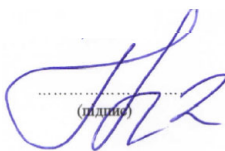
(підпис)

Керівник: доц. Баранов І.О.



(підпис)

Завідувач кафедри: проф. Чернецька-Білецька Н.Б.



(підпис)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
АНАЛІЗ ОПЕРАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ ПРИ ДІЮЧІЙ СИСТЕМІ ЗАКЛАДЕННЯ РЕЗЕРВІВ ЧАСУ У ГРАФІКУ РУХУ ПОЇЗДІВ.....	6
1.1. Дослідження умов функціонування залізничного транспорту загального користування України.....	6
1.2. Аналіз теоретичних і практичних досліджень щодо підвищення надійності графіка руху поїздів за рахунок вибору резервів часу в залізничних системах світу.....	14
РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАТРИМОК ПОЇЗДІВ НА ЗАЛІЗНИЧНІЙ ДІЛЬНИЦІ.....	22
2.1. Технологічні особливості завдання пошуку раціональних величин компенсаційного часу в нитках графіку поїздів різних категорій.....	22
2.2. Розробка математичної моделі для моделювання процесу розповсюдження затримок поїздів на залізничній дільниці	24
2.3. Розробка методу пошуку коефіцієнтів швидкості розповсюдження затримки математичної моделі.....	26
РОЗРОБКА МЕТОДУ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАТРИМОК ПОЇЗДІВ В ЗАЛІЗНИЧНИХ МЕРЕЖАХ ЗА ДОПОМОГОЮ SIR МОДЕЛЕЙ	29
3.1. Просторове представлення проблеми розповсюдження затримок поїздів в залізничній системі	29
3.2. Результати моделювання розповсюдження затримок поїздів на графі залізничного полігону	35
3.3. Визначення раціональних резервів часу у нитках графіка на основі статистичної гри	38
3.4. Дослідження функцій діючих автоматизованих систем АТ “Укрзалізниця”.....	40
3.5. Аналіз надійності перевізного процесу в залізничній системі України.....	58
ЗАКЛЮЧЕННЯ	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	68

ВСТУП

Актуальність теми. 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 проєкту 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 однієї сторони, і Європейським Союзом, Європейським Співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони. 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.

Мета і завдання дослідження. Мета - підвищення надійності та ефективності перевезень на залізничному транспорті України на основі удосконалення методу визначення резервів часу у нитках графіка з використанням моделювання розповсюдження затримок поїздів.

Завдання:

- провести аналіз операційної моделі залізничного транспорту України при діючій системі закладення резервів часу у графіку руху поїздів;
- дослідити процедуру складання нормативних графіків руху поїздів з урахуванням встановлення резервів часу згідно з нормативами АТ «Укрзалізниця»;
- розробити математичну модель процесу розповсюдження затримок поїздів на залізничній ділянці з урахуванням закладеного компенсаційного часу в нитках графіка поїздів різних категорій;
- розробити метод пошуку резервів часу в нитках графіка на основі моделювання розповсюдження затримок поїздів на розгалуженій залізничній мережі.

Об'єкт дослідження - процес складання нормативного графіка руху поїздів на залізничному транспорті України.

Предмет дослідження – процедура визначення величини резервів часу в нитках графіка на основі моделювання розповсюдження затримок поїздів.

Дослідницькі прийоми та методи. Виконані дослідження функціонування залізничного транспорту України при діючій системі закладення резервів часу у графіку руху поїздів базуються на методах математичної статистики та аналізу даних. Для формалізації складних процесів поширення затримок поїздів використано теорію диференціальних рівнянь. Для розв'язання розробленої системи диференціальних рівнянь SIR-моделі використано метод Рунге-Кутта 4-го порядку. Для пошуку параметрів швидкості розповсюдження затримки в системі диференціальних рівнянь у роботі запропоновано використати метод машинного навчання для отримання знань з даних на основі еволюційних обчислень, зокрема бінарний генетичний алгоритм. Використано теорію графів.

Наукова новизна отриманих результатів:

- для формалізації процесу розповсюдження затримок поїздів на залізничній ділянці розроблено модифіковану математичну SIR-модель, яка дозволяє чисельно оцінити вплив поїздів різних категорій і величини їхніх резервів компенсації часу при русі на надійність нормативного графіка руху поїздів.

- для пошуку раціональних резервів часу на відновлення руху поїздів різних категорій залежно від кількості затриманих поїздів у графіку руху розроблено метод моделювання розповсюдження затримок поїздів на розгалужених залізничних полігонах.

Практичне значення отриманих результатів. Практичні результати роботи полягають у тому, що вирішено прикладне завдання автоматизації складного процесу визначення раціональних резервів компенсаційного часу в нитках графіка на основі моделювання поширення затримок поїздів. Завдяки застосуванню методу машинного навчання для отримання знань з даних реальних затримок поїздів на дільниці при пошуку параметрів (коефіцієнтів швидкості розповсюдження затримки) диференціальних рівнянь SIR-моделі вдалося на макрорівні чисельно оцінити взаємовплив поїздів різної пріоритетності у графіку руху поїздів.

Апробація результатів дипломної кваліфікаційної роботи магістра та публікації. Відповідно до теми кваліфікаційної роботи опубліковані наукові публікації у фахових виданнях України, результати роботи докладалися на студентських науково-практичних конференціях кафедри ЛУБРТ СНУ ім. В.Даля (2021-2022р.р.).

Структура і об'єм роботи. Кваліфікаційна робота магістра складається зі вступу, 3 розділів, заключення, списку використаних джерел з 73 найменувань на 7 сторінках. Загальний об'єм кваліфікаційної роботи магістра складає 76 стор. Робота включає 17 рисунків та 3 таблиці по тексту.

1. АНАЛІЗ ОПЕРАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ ПРИ ДІЮЧІЙ СИСТЕМІ ЗАКЛАДЕННЯ РЕЗЕРВІВ ЧАСУ У ГРАФІКУ РУХУ ПОЇЗДІВ

1.1. Дослідження умов функціонування залізничного транспорту загального користування України

На даний час залізнична галузь України знаходиться в процесі реформування, яке проводиться з метою підвищення ефективності діяльності галузі відповідно до положень Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року [13], виконання зобов'язань щодо Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським Співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони (далі – Угода про асоціацію), зокрема статті 368 та Додатку XXXII Угоди про асоціацію [14] та планів її імплементації [15]. Згідно до [13] одним із завдань в напрямі якого реалізується реформа АТ “Укрзалізниця” є запровадження вертикально-інтегрованої системи управління з належним стратегічним плануванням ресурсів та забезпечення відокремлення оператора інфраструктури від вантажних та пасажирських перевізників.

При дослідженні умов функціонування залізничної системи України важливо враховувати значні зміни у 2014 році, коли відбулась військова агресія Російської Федерації, окупація Кримського півострову та активні військові дії на території Донецької і Луганської областей України, що продовжуються станом на 2020 рік. Після даних подій послідувала 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, дозволила Україні перебудувати власну схему напрямлення вагонопотоків та адаптуватись до існуючих умов. Отже, репрезентативним періодом, який характеризує однакові умови функціонування залізничної системи у порівнянні з 2019 роком є 2015-2018 роки. В даному періоді реалізовується 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. [21]. Пасажирські перевезення були й залишаються збитковими. За 2019 рік збитки склали близько 12,8 млрд грн, в т.ч. у приміському сполученні – 6,55 млрд грн [21].

На ринку вантажних перевезень в періоді 2015-2019 роки спостерігається загальний тренд зростання кількісних показників – обсягів перевезених вантажів та вантажообігу [23] (рис. 1.1). Можна констатувати, що існує значний потенціал зростання ринку навіть до кризових показників 2014 року. В найближчій перспективі для залізничного транспорту стає важливим конкурентоздатність на ринку послуг для стабілізації власної частки та збільшення присутності.

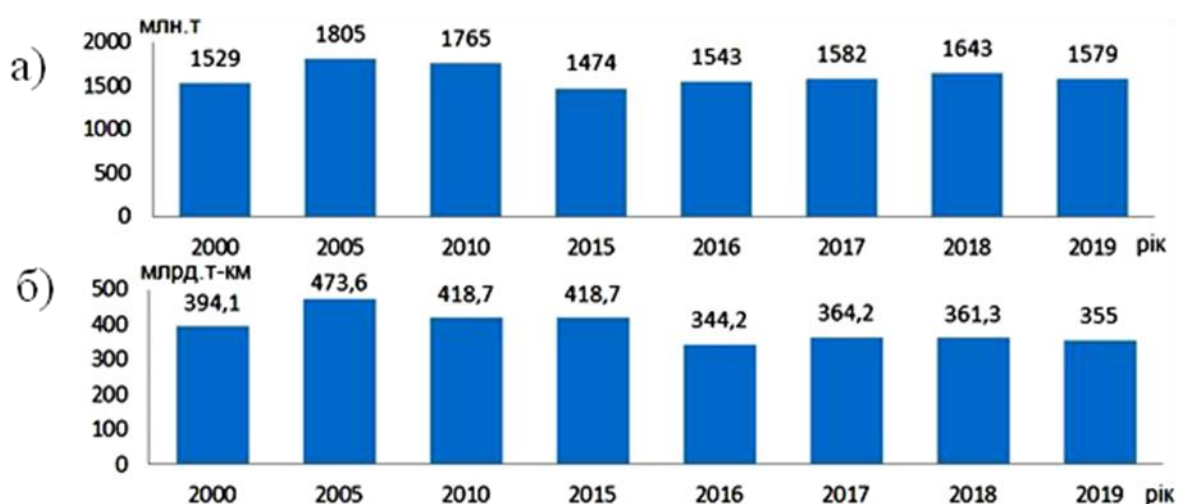


Рис.1.1. Динаміка кількісних показників на ринку перевезень вантажів за всіма видами транспорту України у період 2000-2019 рр: а – перевезено вантажів (млн.т); б –вантажобіг (млрд..т-км)

Діаграми питомої ваги окремих видів транспорту в перевезенні вантажів у 2015 та 2019 роках [23] наведена на рисунку 1.2. У 2019 році в порівнянні з 2015 роком залізничний транспорт зменшив частку в загальних обсягах перевезень вантажів на 3,92%, що в абсолютних величинах складає 37 млн.тонн. За той же період збільшили власні частки два основних конкуренти залізничного транспорту – автомобільний та річковий транспорт. Зокрема автомобільний транспорт збільшив власну частку на 126 млн.тонн, а річковий – на 1 млн.тонн [23].

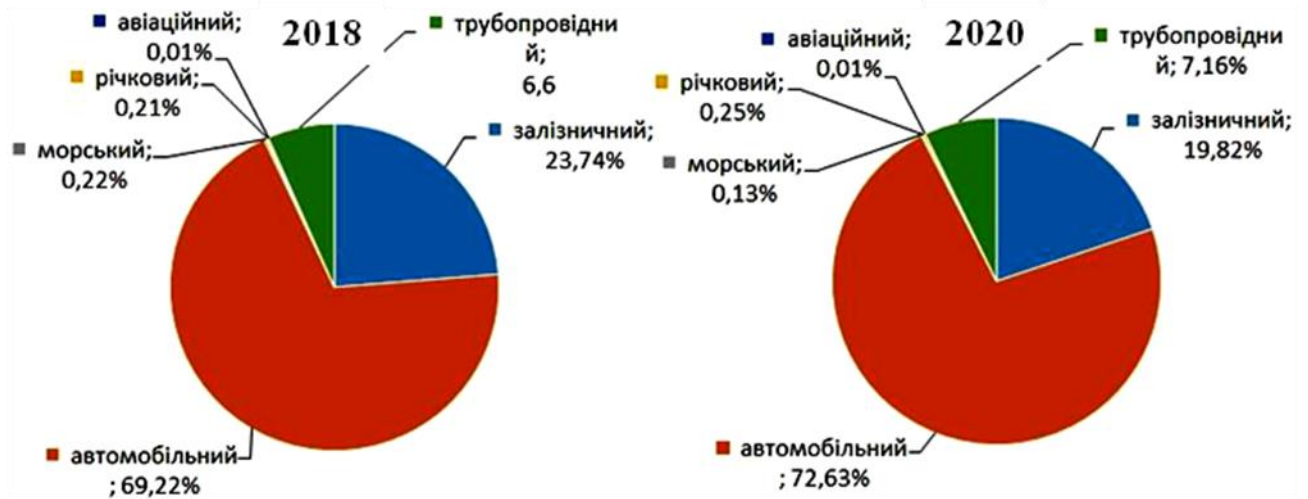


Рис.1.2. Питома вага окремих видів транспорту в перевезенні вантажів у %

Динаміка зміни у відсотках до попереднього року показника обсягів перевезених вантажів на залізничному, автомобільному та річковому транспортах за період 2014-2019 рр наведено в [4]. З 2014 року спостерігається тренд скорочення темпу падіння обсягів перевезень, але ситуація залишається критичною – за загальною тенденцією даний показник має від’ємні значення. В той же період динаміка зміни у відсотках до попереднього року показника обсягів перевезених вантажів на річковому транспорті є позитивною. Обсяги перевезень автомобільного транспорту також показали ві’демні значення у 2019 році - -4,8% від 2018 року, тоді як в період 2014-2018 років обсяги зростали.

Одним із важливих показників конкурентоспроможності виду транспорту є показник середньої відстані перевезення однієї тонни вантажу. На рисунку 1.3 представлено діаграму середньої відстані перевезення однієї тонни вантажів окремими видами транспорту у 2019 році. В одній ніші знаходяться залізничний та річковий транспорт – відповідно 581 км та 406 км, що загострює конкуренцію особливо за умови більш дешевої вартості перевезення у річкового транспорту. Однак, головним недоліком річкового транспорту є значно більші витрати часу на перевезення ніж у залізничного та залежність від погодних умов, що збільшує непередбачуваність перевезення вантажу. Крім того, річковий транспорт має сезонні обмеження – судноплавство обмежується в зимовий період.

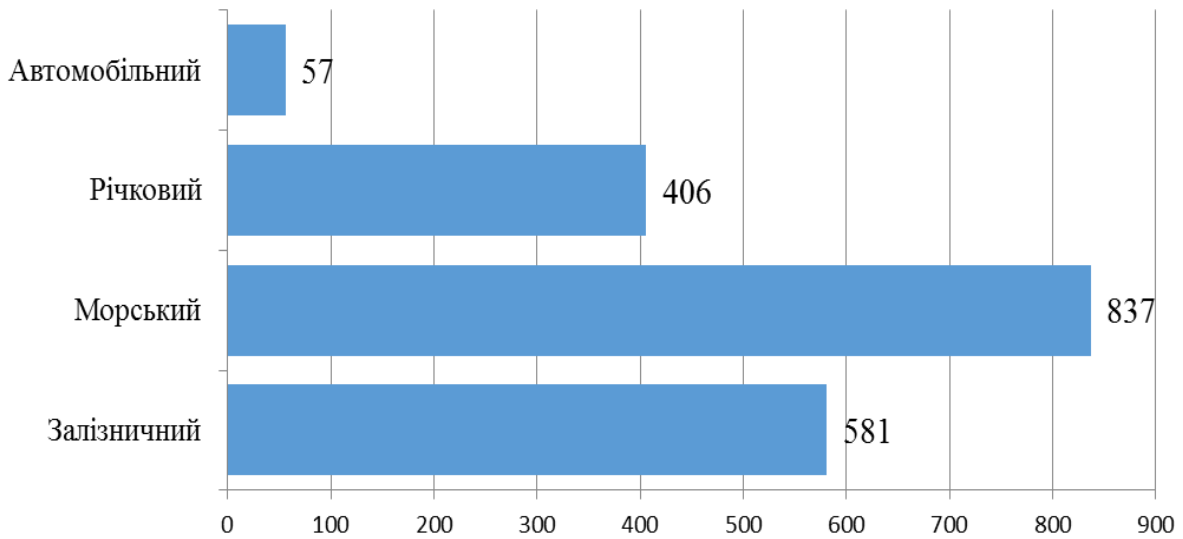


Рис.1.3. Середня відстань перевезення однієї тонни вантажів окремими видами транспорту

Після 2014 року та окупації частини промислових районів Донбасу змінюється структура вантажопотоків в залізничній системі. Перевезення вантажів залізничним транспортом загального користування з розподілом за видами вантажу у період 2015-2019 рр наведено на рисунку 1.4.

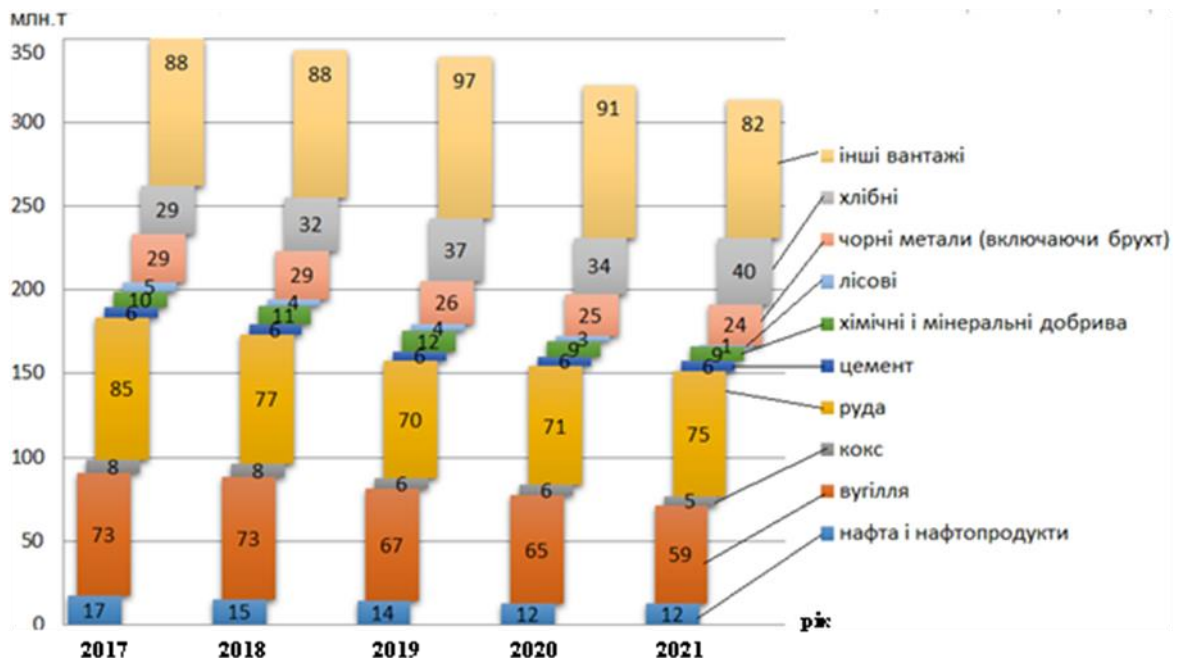


Рис.1.4. Перевезення вантажів залізничним транспортом загального користування з розподілом за видами вантажу

Частка масових вантажів в загальних обсягах перевезення вантажів зменшується, так у 2019 році в порівнянні з 2015 роком відсоток вугілля зменшився на 14%, руда – на 10 %, кокс – на 3%. Високомаржинальні вантажі, особливо, аграрна продукція (хлібні) збільшилась у 2019 році на 11% в порівнянні з 2015 роком. Інші вантажі, до яких можуть відноситись вантажі 3 класу зменшились лише на 6%. Окремо, слід виділити постійне зростання інтермодальних перевезень, так у 2019 році територією України перевезено залізничним транспортом на 14,64 % більше від показників транспортування контейнерів у 2018 р [24]. Контейнерні перевезення організовуються наскрізними поїздами, що курсують за встановленим розкладом. У нормативному графіку руху 2018/2019 років до вже існуючих 15 ниток було додано 26 нових маршрутів з них 32 нитки використовувались регулярно.

Автомобільний транспорт є дорожчим, але має конкурентні переваги за вартістю на відстані до 300 км та вищу швидкість перевезень, а в умовах дефіциту рухомого складу в залізничній системі може конкурувати на маршрутах й на 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.

Згідно до розподілу загального експлуатаційного вантажообігу бруто у 2018 році між пасажирським та вантажним рухом можна стверджувати, що залізнична система України є переважно вантажною – 88% від загального вантажообігу, рис. 1.5. Отже, важливо провести аналіз залізничних вантажних перевезень для виявлення недоліків технології перевізного процесу.

Для аналізу операційної моделі залізничного транспорту України при діючій системі закладення резервів часу у графік руху поїздів в даній роботі проведено дослідження складових елементів обороту вагона за 2007 та період 2011-2019 років [2]. Важливий елемент обороту вагона є час знаходження вагона в русі, який зростає за весь досліджувальний період з причин погіршення технічного стану інфраструктури, тягового рухомого складу та відсутності закладеного рівня надійності ГРП.

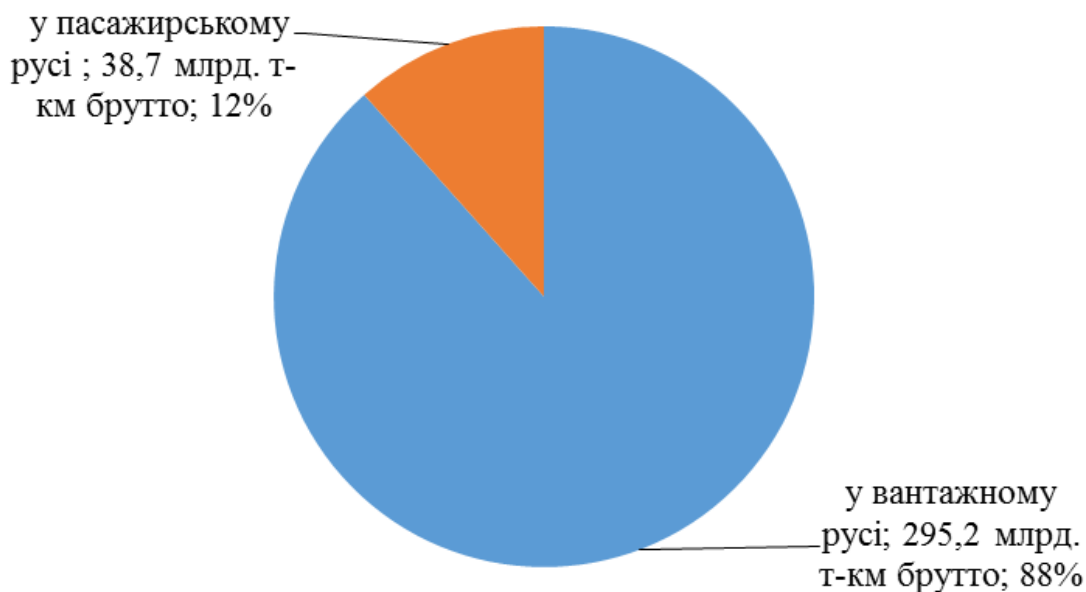


Рис.1.5. Розподіл часток загального експлуатаційного вантажообігу брутто між пасажирським та вантажним рухом

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 (в середньому поїзд складається з 45-55 вагонів з масою 4500-5000 тонн), застосовується принцип відправлення поїздів “за готовністю”, тобто якщо проведені всі операції з поїздом, то поїзд відправляють без дотримання розкладу руху. Це спричиняє не дотримання графіка руху поїздів, а тому на мережі АТ “Укрзалізниця” за розкладом слідують 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 забезпечують менші ризики в перевізному процесі [27]. В досить різних залізничних системах Північної Америки, Європи, Австралії і не тільки спостерігається єдиний тренд зміни операційної моделі, що ґрунтується на підвищенні точності та надійності руху поїздопотоків. Крім того, в межах запланованого [15-19] вертикального розділення АТ “Укрзалізниця” виникає необхідність кращої координації та

дотримання наданого компаніям-перевізникам графіка руху поїздів. Такий підхід вимагає планування операцій в часі і просторі з можливістю закладення резервів часу для їх реалістичного виконання на кожен день.

В таких умовах все більшої важливості в практиці експлуатації залізничних систем набуває нормативний документ – графік руху поїздів (ГРП) [28], який є планом розподілу часу слідування 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 [20].

В умовах впровадження цифровізації, автоматизації та IoT [29-31] з'являються нові можливості для використання графіку руху поїздів як зв'язуючого 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 в цифрову модель для бронювання місць в складі поїзда із закладеним часом переформувань на станціях і прибуттям вантажної відправки на станцію вивантаження. Графік руху стає інтегрованим в межах спеціально створених цифрових платформ складання ГРП з ув'язкою з автоматизованих систем добового планування сортувальних станцій та диспетчеризації. Такий підхід відрізняється від старих концепцій експлуатації залізничних систем започаткованих у 60-х роках минулого сторіччя, де 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.

В нових умовах графік руху поїздів є сітьовим технологічним документом, що визначає основні нормативи технологічного процесу перевезень, який не просто відсторонено відображає нераціональну і суб'єктивну схему направлення поїздопотоків, а пристосовує попит і пропозицію. Це дозволяє підвищити

надійність перевезень в залізничних системах, підвищити провізну та пропускну спроможність мережі, зменшити експлуатаційні витрати без додаткових капітальних вкладень в інфраструктуру та рухомий склад.

Враховуючи важливу особливість залізничної системи України, яка працює без встановленого графіку руху вантажних поїздів в даному дослідженні запропоновано провести аналіз надійності перевізного процесу.

Аналіз рівня виконання нормативного графіка руху поїздів на мережі АТ “Укрзалізниця” свідчить про досить високі показники точності (рис. 1.6)

Виявлено, що затримки в мережі згубно впливають на строки доставки вантажів, зокрема у грудні 2019 року в середньому за добу порушувалась доставка у 43,3 вантажні відправки. Це свідчить про значні проблеми в системі планування руху поїздопотоків та відсутності достатнього рівня надійності ГРП.



Рис.1.6. Діаграма розподілу рівня виконання нормативного графіка руху поїздів різних категорій

Залізнична система України працює без встановленого графіку руху вантажних поїздів та 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.

1.2. Аналіз теоретичних і практичних досліджень щодо підвищення надійності графіка руху поїздів за рахунок вибору резервів часу в залізничних системах світу

Досліджень присвячених вивченню завдань підвищення надійності графіків руху поїздів, моделювання поширення затримок поїздів в залізничних мережах існує досить багато. Даним завдання приділена увага в наукових роботах вчених різних країн світу, зокрема А. Landex, Т. Dick, Т. Büker, В. Seybold, М. Goerigk, А. Schöbel, N. Kliewer, L. Suhl, W. Schwanhäusser, М. Müller-Hannemann, R.M.P. Goverde, М. F. Gorman та ін [3-5].

Рішенням завдань щодо підвищення точності доставки вантажів, автоматизації розрахунку графіку руху поїздів та його виконання, підвищення надійності графіка при адаптивному керуванні параметрами руху поїздів, визначенням резервів займалися такі вчені як: С.В. Панченко, М.І. Данько, Т.В. Бутько, І.В. Жуковицький, В.В. Повороженко, А.В. Прохорченко, В.К. В.І. Мацюк, Є.В. Нагорний, Д.М. Козаченко, Д.В. Ломотько, О.В. Лаврухін, А.Д. Каретніков, Н.А. Воробйов, Н.А. Самаріна, Є.М. Тішкін, Н.Ю. Шраменко, Ю.С. Хандакарова та ін.

Закладання раціонального резерву часу в графік руху поїздів є складним завданням для залізниць, тому що слід задовольнити потреби часу перевезення не тільки пасажирів, а й вантажовідправників та самої залізниці для уникнення збитковості [41, 42]. Дослідженням в напрямі пошуку ефективних методів встановлення резервів часу у графіку руху поїздів присвячено багато праць. Зокрема, у своїх дослідженнях [43] порівнює ефективність різних стратегій застосування резервів часу у розкладах руху на залізниці Данії з рекомендаціями

UIC. У роботі [44] на основі аналізу затримок поїздів на залізницях Голландії, Швейцарії, Німеччини були визначені порогові значення затримок для різних категорій поїздів в цих країнах. Дослідження [45] було зосереджено на огляді стану практики та існуючих процедур планування розкладу на основі правил залізничних адміністрацій з кількох європейських країн. Виявлена низка недоліків в розробці графіка руху, одним з яких є відсутність дієвих інструментів моделювання, оптимізації та методів аналізу даних для покращення розкладів.

Одним із прикладів практичної реалізації застосування теоретичних досліджень, що представлені в [46] є реалізований проєкт програмного забезпечення для автоматизації складання та перевірки на надійність графіків руху поїздів за назвою OnTime [47,48]. Даний програмний продукт використовується операторами інфраструктури Schweizerischen Bundesbahnen SBB (Швейцарія), INFRABEL (Бельгія), DB Netz AG (Німеччина) та ProRail (Нідерланди) для виявлення вузьких місць в мережі та встановлення резервів часу для можливості поглинання затримок поїздів [49].

У роботі [50] розглянуто проблему втрати часу руху поїздів через обмеження швидкості на окремих ділянках на основі аналітичного підходу. Однак, даний метод при встановленні резерву не враховує категорії пасажирських поїздів та раптову появу обмеження швидкості через незаплановані ремонти колії. На залізничний транспорт має вплив велика кількість дестабілізаційних факторів, тому важливо в графік обороту составів пасажирських поїздів закладати резерви часу для вчасного прибуття поїздів на станції призначення. При цьому недостатні величини резервів можуть викликати збої в технологічному процесі перевезення, конфліктні ситуації при зайнятті перегонів і значні вторинні затримки, а зайві резерви викликають погіршення показників використання локомотивів, локомотивних бригад, вагонів, станційних колій та неефективне використання пропускнуої спроможності перегонів [51]. Дослідження [52] спрямоване на аналіз визначення затримок поїздів, а також встановлення резервів часу, які необхідно закладати у маршрут слідування вантажних поїздів за розкладом на основі статистичного підходу. Цей метод є досить неточним та узагальнюючим. У роботі [53] запропонована

вдосконалена імітаційна модель залізничного напрямку, яка відображає процес пропуску поїздів по ділянках і через залізничні станції та дозволяє оцінити вплив використання пропускнуої спроможності на тривалість руху поїздів. Однак, даний підхід дозволяє тільки виявити проблеми надійності графіка руху поїздів, встановити тривалість руху поїздів, але не призначений до визначення раціональних резервів часу у ГРП.

В межах розробки методів встановлення величини резерву часу у ГРП для підвищення надійності графіку руху важливим є точність прогнозування розповсюдження затримок поїздів в мережі. На основі проведеного аналізу різних підходів до прогнозування розповсюдження затримок поїздів в мережі, виокремлено наступні: детермінований, стохастичний, статистичний.

Найбільше наукових робіт присвячено вивченню даної проблеми для залізничних систем з дотриманням розкладу руху та якісним його аналізом [54-57]. В першу чергу це пов'язано з можливістю проведення деталізованих розрахунків впливу різних видів затримок у запланованих графіках руху поїздів (англ., *planned schedule*) [58]. Саме детермінований підхід до розрахунку поширення затримки у плановому графіку руху поїздів був запропонований у роботі [59]. Запропонований алгоритм був перевірений на графіках руху Deutsche Bahn AG і довів свою ефективність при великих обсягах обчислень. До детермінованого підходу можна віднести дослідження [60]. У цій роботі представлено модель та алгоритм на основі лінійної системи на базі *max-plus* алгебри для обчислення поширення первинних затримок за періодичним розкладом руху поїздів (англ., *periodic railway timetable*). Динаміка поширення затримки аналізується залежно від таких властивостей розкладу, як: відновлюваність та стабільність (англ., *realisability and stability*). Для визначення раціональних величин резерву на станціях запропоновано програмний інструмент TNV-Prepare, який дозволяє аналізувати в залізничній мережі Нідерландів відхилення в циклічних розкладах руху поїздів та виявляти недоліки розкладу [60]. У Нідерландах поїзди курсують в основному за циклічним графіком – повторення одного і того ж часу прибуття і відправлення щогодини, за винятком додаткових пасажирських поїздів у години-пік і вантажних поїздів,

які курсують між регулярними поїздами. Однак, в залізничній системі України пасажирські поїзди курсують за нециклічним графіком руху, а вантажні в загальні без дотримання розкладу руху, що не дозволяє застосувати даний підхід до України. Метод розкладання [61]., заснований на лінійності, вводиться для окремого виду структурних та початкових затримок, але такий алгоритм може бути використаний тільки на великомасштабних мережах циклічного графіка руху.

За детермінованим підходом дуже точно можна вивчати реакцію мережі на затримки, але його застосування не дозволяє реалістично оцінити динаміку поширення затримок для залізничних мереж в яких повністю або частково відсутній плановий розклад руху поїздів [6]. В таких країнах як Україна, Білорусь, Казахстан, Індія, або подібних до них, в залізничних системах переважає рух вантажних поїздів у великих обсягах для яких дотримання графіка руху є недоцільним з причин не прогнозованості в часі та просторі утворення вантажопотоків. Як наслідок, вантажні поїзди зі станцій формування відправляються “за готовністю” – після проведення всіх необхідних технічних та комерційних операцій з составом поїзда на сортувальних станціях диспетчерський персонал приймає рішення про відправлення поїзда з міркувань забезпечення нормативних мінімальних інтервалів між поїздами та наявності найближчого вільного часового вікна для слідування даного поїзда. В таких умовах поїздопотоки слідуєть в мережі за відсутніми планами руху, що ускладнює їх аналіз щодо відхилення від нормативних часових норм слідування в мережі. Можна виділити декілька досліджень, що спрямовані на вивчення надійності графіка руху поїздів в залізничних системах без дотримання розкладу відправлення вантажних поїздів [63]. Набагато більше праць присвячено автоматизації графіка руху поїздів [64-67]. Дані розроблені математичні моделі потенційно можуть бути використані для дослідження впливу затримок поїздів на показники надійності графіка руху поїздів, але застосування їх затосування для визначення резервів часу у ГРП відсутні.

Окремо, слід виділити, стохастичний підхід до моделювання поширення затримок [68-72]. Стохастичний підхід дозволяє більш точно та адекватно

спрогнозувати поширення затримки [73], але вимагає верифікованих вхідних даних щодо параметрів розповсюдження затримок, які не завжди можна отримати. Багато досліджень спрямовані на статистичний аналіз виконаних графіків руху поїздів для пошуку статистичних закономірностей в процесі розповсюдження затримок [74]. Крім того, всі підходи можна розділити за рівнем деталізації на мікро- та макромодельовання. Імітаційні моделі, що засновані на принципах мікромоделювання дозволяють отримати більш точні результати, але для їх роботи важливим є знання нормативного графіка руху поїздів.

В роботі [75] запропонована стохастична математична модель для імітації поширення затримок пасажирських поїздів з урахування пересадок пасажирів на залізничній мережі Німеччини. Таку модель за детальною класифікацією, можна віднести до мікроскопічних підходів, коли для моделювання необхідний плановий графік руху поїздів. Це не дозволяє її застосовувати для систем без дотримання розкладу руху, зокрема для моделювання динаміки поширення затримок вантажних поїздів на мережі без дотримання розкладу та при змішаному їх русі з пасажирськими поїздами на лінії. До мікроскопічного підходу можна віднести й роботу [76]. Більш адекватним в таких умовах функціонування залізничної мережі є застосування макроскопічного підходу до формування стохастичних моделей поширення затримок. Наприклад, в роботі [77] запропонована стохастична математична модель на базі ланцюга Маркова, для імітації поширення затримок вантажних поїздів з урахування здатності інтермодальних терміналів (intermodal terminals) поглинати затримки, що виникають в мережі.

Деякі роботи присвячені дослідженням стабільності розкладів поїздів на основі статистичних аналізів реальних даних щодо виконання графіків руху поїздів [78, 79, 80]. Наприклад, робота [81] присвячена аналізу виконання графіка руху поїздів на мережі інфраструктурної компанії DB Netze AG за допомогою використання методів аналізу Big Data. У [82] запропоновано метод прогнозування затримок поїздів для залізничної лінії Beijing-Guangzhou в Китаї на основі моделі регресійних дерев з посиленням градієнтом (The gradient-boosted regression trees model, GBRT). В роботі [83] для прискорення виявлення проблем

у розкладах запропоновані способи візуалізації та статистичної обробки даних щодо затримок поїздів в залізничній мережі. Однак, статистичний підхід до вивчення поширення затримок поїздів дозволяє дослідити лише варіанти, що виникали в історичній ретроспективі і не надає можливості отримати реакцію залізничної мережі у випадку виникнення затримок, які були відсутні в періоді, що досліджувався.

В роботі [84] запропоновано використати динамічну модель розповсюдження затримок для пошуку стратегій управління рухом, що запобігають затримкам поїздів, в умовах роботи високоінтенсивної залізничної системи, до якої відноситься залізниця Японії. Доведено, що динамічна система за запропонованою стратегією асимптотично стабільна в рівновазі, тобто графіки руху поїздів можна підтримувати для підвищення надійності перевізного процесу.

Важливим є напрям досліджень щодо факторного аналізу причин та параметрів поширення затримок поїздів. У роботі [85] для умов функціонування залізничної мережі США проведені факторні дослідження впливу технічних та експлуатаційних показників на середню тривалість руху поїзда. Глибокий аналіз таких напрямів досліджень наведений в роботі [86]. Автори зазначають велику перспективність застосування методів аналізу на основі машинного навчання (англ., machine learning, ML) [87, 88].

Згідно до аналізу, що дозволив виявити переваги і недоліки різних підходів до моделювання [3-6] більш прийнятним та ефективним для залізничної системи з частковим дотримання розкладу руху поїздів є застосування макроскопічного підходу до моделювання поширення затримок поїздів. Такий підхід більш адекватно може описати невизначеність параметрів системи руху поїздопотоків без дотримання графіка руху в мережі, врахувати топологічні властивості мережі та вплив так званого “мережевого ефекту” [89]. Спираючись на розвиток методів аналізу складних мереж вже існують дослідження спрямовані на формалізацію динаміки поширення затримок поїздів на топологіях великих мереж [90,91]. Одним із перспективних напрямів моделювання розповсюдження затримок поїздів на макрорівні є застосування модифікованих епідеміологічних

математичних моделей, що використовуються для моделювання епідемій, розповсюдження вірусів, тощо. Як приклад, можна навести роботи в галузі авіаційного транспорту [92], де для моделювання поширення затримок в мережі аеропортів використано епідемічну модель типу SIS. Проведені перевірки побудованих моделей на даних польотів в Європі довели реалістичність отриманих результатів. В роботі [93] було застосовано модель динаміки поширення затримок у складних мережах повітряного транспорту на основі модифікованої епідеміологічної SIR-моделі. Для підвищення точності моделювання в моделі введено обмеження на використання пропускну спроможності повітряного коридору.

Враховуючи, що окрім авіаційної галузі моделі розповсюдження інфекцій набули розвитку в телекомунікаційній галузі для аналізу розповсюдження вірусів, і тому досить перспективним є їх застосування в галузі залізничного транспорту. Відомо лише декілька досліджень в області моделювання розповсюдження затримок на основі інфекційної моделі в галузі залізничного транспорту. В роботі [94] автори застосовують готовий програмний продукт LinTim без модифікацій алгоритму. Результати моделювання дозволяють припустити, що розповсюдження затримки поїздів має аналогічне підґрунтя з механізмом розповсюдження інфекційних хвороб. В роботі [95] використано модель SIR для імітації поширення затримки по всій залізничній транзитній мережі Нідерландів. Запропоновано евристичний підхід для визначення частоти зараження. В результаті модель адекватно імітує процеси виникнення великих затримок. Однак система руху поїздів в мережі ґрунтується на періодичних розкладах руху і не може бути застосована до мереж, подібних українській. Крім того, дана модель не враховує обмеження на пропускну спроможність дільниць між станціями в мережі та їх ступінь завантаженості, що могло б дозволити підвищити точність моделювання. Успішним прикладом застосування епідеміологічної моделі є робота [96], де запропоновано математичну SIR модель для дослідження перевантажень в пасажирській міській залізничній мережі та кількісно оцінено вплив різних факторів, зокрема пропускну спроможності на швидкість поширення затримки. Однак, застосування такої моделі для

визначення резервів часу у графіку руху залізничних мереж змішаного руху пасажирських і вантажних поїздів без дотримання останніх розкладу руху неможливо. У дослідженні [91] запропонована SIS-модель поширення епідемії, яка здатна відтворювати емпіричний розподіл затримок поїздів. Даний підхід передбачає можливість виникнення декількох затримок для одного поїзда. Результати моделювання в умовах руху поїздів за розкладом в італійській залізничній мережі підтвердив адекватність математичної моделі реальним процесам розповсюдження затримок.

Результати досліджень доводять, що методи моделювання на основі епідеміологічних моделей дозволяють прискорити розрахунки і врахувати складні залежності в часі. Наведене дозволяє стверджувати, що для можливості прискорення складних розрахунків, врахування складної динаміки поширення затримок та більш адекватного опису невизначеності параметрів системи руху потоків в залізничній системі без дотримання розкладу руху вантажних поїздів доцільним є проведення досліджень за допомогою застосування макроскопічного підходу до моделювання поширення затримок поїздів. Одним із перспективних напрямів є застосування модифікацій епідеміологічних моделей.

2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАТРИМОК ПОЇЗДІВ НА ЗАЛІЗНИЧНІЙ ДІЛЬНИЦІ

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

Для залізничних систем без дотримання графіка руху вантажних поїздів, до яких відноситься залізниця України, правила встановлення резервів часу у нитці поїздів різних категорій є досить загальними, що потребує проведення досліджень впливу поїздів різних категорій та величини їх резерву часу на надійність графіка руху на дільниці [3]. Враховуючи, що найбільш невивченим є час для відновлення у нитці, що розподілений за способом компенсації під час руху (англ., *running time supplements*) [32]. Компенсація під час руху полягає у використанні різниці між мінімальним часом слідування поїзду по дільниці та часом, що запланований розкладом та містить складову – час регулярної добавки, який додається до часу слідування поїзда по кожній дільниці відповідно до вимог оператора інфраструктури. Величина добавки (резерв часу) у різних залізничних системах є різною в залежності від дальності слідування поїзда, часу слідування та стоянки на станціях. Цей резерв часу у випадку запізнення поїзда дозволяє виконати операцію нагін – прискорення ходу поїзда у порівнянні з передбаченим плановим розкладом з метою скорочення запізнення та уникнення сценаріїв каскадних затримок із значними витратами. На рис. 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 поїзду №2002 виникла первинна затримка тривалістю $t_{\text{delay}} = 14$ хвилин 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 слідують пачкою згідно нормативного розкладу з вищим пріоритетом.

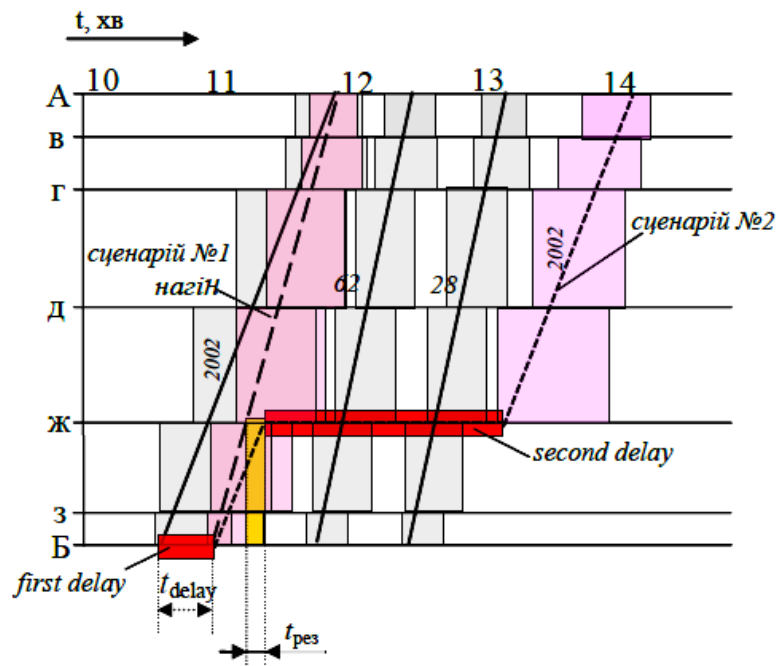


Рис.2.1. Схема сценаріїв руху поїздів при виникненні затримки на двоколійній дільниці: сценарій 1 – реалізація операції нагін; сценарій 2 – виконання операції обгону з пасажирськими поїздами

У випадку існування резерву часу - компенсації під час руху, розвиток подій може змінитись на сценарій 1, який передбачає передачу наказу від диспетчера машиністу вантажного поїзда №2002 для можливості прискорення останнього на першому перегоні Б-з на 2 хвилини, на другому з-ж на 4 хв; третьому перегоні ж-д на 5 хвилин; четвертому перегоні д-г на 5 хвилини; на перегоні г-в на 4 хвилини, що дозволить вантажному поїзду №2002 прибути на станцію А у відповідності до нормативного розкладу руху поїздів. Один із прикладів розвитку сценаріїв в 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 заняття 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 графіку поїздів різних категорій. Це дозволить знайти баланс між надійністю графіка руху та практичною пропускною спроможністю залізничної дільниці [98, 99].

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

Для вирішення задачі пошуку раціональних величин компенсаційного часу в нитках графіку поїздів різних категорій запропоновано застосувати SIR-модель (“Susceptible–Infected–Removed model”), яку використовують для моделювання розповсюдження інфекційних захворювань у замкненому суспільстві, розповсюдження вірусів в комп’ютерній мережі та випадків спланованого впливу на агента в соціальних мережах [100-101]. Адаптуючи дану модель до задачі впливу величини затримок поїздів на залізничній мережі, можна представити процес розповсюдження інфекційних хвороб як процес розповсюдження затримки поїздів та пов’язаного впливу на рух поїздів на залізничній мережі. В межах прийнятої постановки задачі для опису впливу резерву часу у нитці графіка поїздів різних категорій в роботі запропоновано загальну кількість поїздів на розрахунковій дільниці представити в трьох станах, причому кожний з них являє собою визначний етап при розвитку розповсюдження затримки.

Таким чином, загальну кількість ниток поїздів (вантажні та пасажирські) слід розділяти умовно на групи: чутливі до затримки поїзди, які в момент часу слідує за графіком але потенційно можуть бути затримані при русі на дільниці (англ., Susceptible); поїзди, що слідує із затримкою та впливають на слідування інших поїздів, передаючи їм затримку (англ., Infected); поїзди, що за час слідування через залізничну дільницю з затримкою, поглинули її (виконали нагін), слідує за графіком, та не впливають на виникнення затримок в подальшому русі (англ., Removed) [1,8,9,12]. На рис. 2.2 наведено граф процесу переходу поїздів між станами на дільниці.

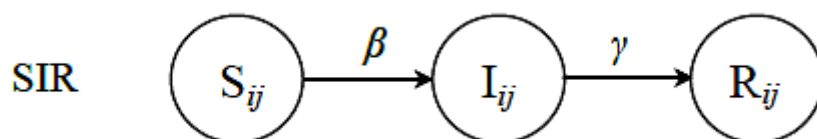


Рис.2.2. Граф процесу переходу поїздів між станами на дільниці

Враховуючи важливість обліку різної пріоритетності руху на дільниці поїздів різних категорій запропоновано розширити групи станів на підгрупи- класи відповідно до їх категорії r . Для змішаної моделі експлуатації дільниці в даному дослідженні запропоновано врахувати наступні категорії поїздів: $r=1$ – пасажирські поїзди; $r=2$ – приміські поїзди; $r=3$ – вантажні поїзди. Згідно до діючих правил [102,103] ієрархія пріоритетності відповідає зазначеній їх послідовності категорій. Зроблено припущення, що поїзди кожного класу мають однакові характеристики процесів передачі затримки та відновлення руху.

Згідно до [104] математичну модель можна записати як систему диференційних рівнянь виду:

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

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

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

де S^r – кількість сприятливих поїздів в класі r на дільниці, поїздів; $\beta^{r,l}$ – швидкість розповсюдження затримки від поїздів класу r до поїздів класу l на дільниці, год⁻¹, де $r=l, r,l \in R$; I^l – кількість інфікованих поїздів класу l на дільниці, поїздів; R^r – кількість поїздів класу r , що слідували з затримкою, але поглинули її, поїздів; γ^r – швидкість відновлення затримки у поїздів класу r на дільниці; t – час або крок моделювання, година. Всі параметри системи мають додатні значення.

Система рівнянь має умову нормування виду $N^r = S^r(t) + I^r(t) + R^r$, де N^r – загальна кількість поїздів класу r на дільниці, $N = \sum_r N^r$, N – загальна кількість поїздів всіх 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 та затриманих поїздів в класі r на дільниці при $t = 0$ відповідно.

Важливими параметрами системи (2.1) є швидкість розповсюдження затримки від поїздів та швидкість відновлення затримки у поїздів класу r на дільниці. В даному дослідженні запропоновано провести дослідження за наступною послідовністю: на першому етапі розробити метод для пошуку параметрів на даних затримок реальної дільниці, а після провести моделювання розповсюдження затримки з різними швидкостями відновлення затримки. \square

2.3. Розробка методу пошуку коефіцієнтів швидкості розповсюдження затримки математичної моделі

Для пошуку параметрів швидкості розповсюдження затримки в системі диференційних рівнянь (2.1) в роботі запропоновано використати метод еволюційних обчислень, зокрема генетичний алгоритм, BGA [105-107]. В загальному вигляді задачу пошуку параметрів можна представити, як задачу оптимізації виду \square

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

де F – цільова функція, що оцінює між емпіричними значеннями кількості інфікованих (затриманих) поїздів I^r та модельними I_m^r , що отримані при розв’язанні системи диференційних рівнянь (1) з урахуванням заданих початкових умов, що відповідають реальним [108]; $g(\beta) = 0$; $h(\beta) \leq 0$ – обмеження рівності та нерівності відповідно, що відповідають постановці задачі розв’язку системи (2.1). В межах розв’язку оптимізаційної задачі (2.2) в системі (2.1) параметри $\gamma^r = 0$.

Для реалізації оптимізаційної задачі (2) в межах генетичного алгоритму змінні моделі представлено у формі хромосоми фіксованої довжини з урахуванням обмежень на їх 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’язок системи диференційних рівнянь (2.1) в межах фітнес функції GA запропоновано виконати чисельним методом Рунге-Кутта 4-го порядку [109,110]. Критерієм оцінки підбору змінних в оптимізаційній задачі (2.2) застосовано середню абсолютну похибку (MAPE) між емпіричними та модельними результатами [112,113]

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

де показник $F(\beta)$ не визначений для нульових значень $I_m^r(t)$, M – кількість строк 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'язку системи диференціальних рівнянь (1) при початкових умовах $(S_0^r, I_0^r, 0)$, що відповідають q -й строчці вибірки $\langle \bar{X}_q, \bar{y}_q \rangle$, $(S_0^r, I_0^r, 0) \in \bar{X}_q$.