

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет залізничного транспорту

ГУРІН ДМИТРО ОЛЕГОВИЧ



УДК 656.222.5

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ РЕЗЕРВІВ ЧАСУ У
НИТКАХ ГРАФІКУ НА ОСНОВІ МОДЕЛЮВАННЯ
РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАТРИМОК ПОЇЗДІВ**

05.22.01 – транспортні системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, доцент
Прохорченко Андрій Володимирович,
Український державний університет залізничного транспорту, кафедра управління експлуатаційною роботою, професор кафедри.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Шраменко Наталя Юрївна,
Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, кафедра транспортних технологій і логістики, професор кафедри;

кандидат технічних наук, доцент
Нестеренко Галина Іванівна,
Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, кафедра управління експлуатаційною роботою, доцент

Захист відбудеться «23» квітня 2021 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.04 в Українському державному університеті залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

Автореферат розісланий «20» березня 2021 р.

В.о. ученого секретаря
спеціалізованої вченої ради



О. М. Огар

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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 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 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.

Діючі 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 запізнювався, у графік 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 на основі отриманих результатів коригувати нормативний ГРП до його введення в дію.

Зважаючи на викладене вище, тема дисертаційної роботи є актуальною і зорієнтованою на вирішення важливого завдання удосконалення методу визначення резервів часу в нитках графіка для залізничних мереж без дотримання розкладу руху, до яких належить залізнична мережа України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до Транспортної стратегії України на період до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України (КМУ) від 30 травня 2018 р.

№ 430-р), Постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження основних засад здійснення державної власності щодо акціонерного товариства «Українська залізниця» (від 12 червня 2019 р. № 628), Постанови Кабінету Міністрів України «Про виконання Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони» від 25 жовтня 2017 р. №1106 із внесеними останніми змінами, включаючи імплементацію Директив 91/440/ЄС, 95/18/ЄС, 2001/14/ЄС, 2004/49/ЄС, 2007/59/ЄС і відповідних їхнім планам заходів, а також науково-дослідних робіт за темами, у яких автор брав безпосередню участь як виконавець: «Розробка технічних умов на «Ваги вагонні тензометричні» (ДР №0121U109934); «Розробка методу визначення раціональних резервів часу на відновлення руху поїздів різних категорій» (ДР №0120U105346).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є 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. Це дозволить підвищити швидкість і якість складання нормативного графіка руху поїздів на залізниці України за рахунок автоматизації складного процесу пошуку раціональних величин компенсаційного часу в нитках поїздів різних категорій на полігонах залізничної мережі і, як наслідок, підвищити пунктуальність і надійність нормативних графіків руху поїздів.

Реалізація цієї мети потребує постановки та вирішення таких задач дослідження:

- 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»;
- провести аналіз теоретичних і практичних досліджень щодо підвищення надійності графіка руху поїздів за рахунок вибору резервів часу в залізничних системах світу;
- 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;
- сформулювати вимоги до автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу в нитках графіка;
- провести економічне обґрунтування від підвищення надійності графіка руху поїздів і зменшення впливу затримок поїздів в умовах встановлення раціональних резервів часу в нитках графіка на залізничній мережі України.

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.

Методи дослідження. 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, методи імітаційного моделювання, матричних обчислень, візуалізації даних для моделювання розповсюдження затримок поїздів на розгалуженому залізничному полігоні. При формуванні вимог до інформаційно-керуючої системи з реалізацією СППР для визначення раціональних резервів часу в нитках графіка використано метод дослідження інформаційних потоків.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі для залізничних систем без дотримання розкладу відправлення вантажних поїздів теоретично обґрунтовано процедуру визначення резервів часу в нитках графіка на основі моделювання розповсюдження затримок поїздів різних категорій.

Вперше:

- для формалізації процесу розповсюдження затримок поїздів на залізничній дільниці розроблено модифіковану математичну епідеміологічну SIR-модель, яка дозволяє чисельно оцінити вплив 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 отримання 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 моделювання розповсюдження затримок поїздів на розгалужених залізничних полігонах. Цей метод дозволяє 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. Це дозволяє пришвидшити точність складних і тривалих розрахунків поширення затримок поїздів з урахуванням впливу «мережевого ефекту».

Удосконалено:

- комплекс функціональних задач системи АСК ВП УЗ-Є на основі формування вимог до автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу в нитках графіка, яка забезпечує підвищення швидкості та якості складання нормативного графіка руху поїздів на залізниці України, що набуває важливого значення в умовах реалізації перевезень за розкладом руху маршрутних поїздів (РРМП) та доступу приватних локомотивів до залізничної інфраструктури

загального користування.

Практичне значення одержаних 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. Це дозволяє в подальшому оцінити вплив поїздів різних категорій на дільниці або мережі в цілому з урахуванням впливу «мережевого ефекту» для формулювання обґрунтованих правил пріоритетності пропускання поїздів в умовах відкритого доступу до залізничної інфраструктури. Запропонований підхід з формалізації гетерогенної динаміки поширення затримок від потоків поїздів різної пріоритетності дозволив підвищити точність моделювання поширення затримок поїздів – похибка між емпіричними та модельними результатами складає до 10 % в умовах швидких розрахунків.

Розроблено вимоги до створення автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу в нитках графіка на основі запропонованого комплексу математичних моделей для можливості промислової реалізації програмних інструментів для визначення величин резервів часу в нормативних графіках руху поїздів до введення їх у дію. Очікується, що загальна сума економічного ефекту з наростаючим підсумком за п'ять років в умовах підвищення надійності графіка руху поїздів і зменшення впливу затримок на тривалість руху вагонів в поїздах на основі встановлення раціональних резервів часу на залізниці України становитиме близько 566 млн. грн., середній оборот вантажного вагона зменшиться на 3,23% у порівнянні з діючою технологією.

Результати дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ) при підготовці фахівців з організації перевезень на залізничному транспорті. Результати дослідження використано при удосконаленні експлуатаційної роботи залізничних полігонів структурного підрозділу «Регіональний центр управління рухом» регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця», що підтверджується відповідними актами впровадження, наведеними в додатках до дисертаційної роботи.

Особистий внесок здобувача. У наукових працях, опублікованих зі співавторами, особистий внесок полягає у такому: у роботі [1] проведено моделювання впливу кількості затриманих поїздів різних категорій від закладених резервів часу в нитках поїздів; у роботі [2] проведено аналіз елемента середнього обороту вантажного вагона - знаходження вагона в русі та затримок поїздів у мережі АТ «Укрзалізниця»; у роботі [3] розроблено модифіковану математичну епідеміологічну SIR-модель; у роботі [5] проведено аналіз тривалості знаходження вагонних відправок на технічній станції та рівня виконання ГРП на основі методів машинного навчання; у роботах [6, 12] розроблено метод на основі моделювання розповсюдження затримок поїздів на розгалужених залізничних полігонах; у

рроботі [4,11] проведено розрахунок зміни дільничної швидкості руху поїздів на дільниці. Дослідження, висвітлені в усіх наукових працях, проводилися в УкрДУЗТ.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідалися, обговорювалися та ухвалені на таких конференціях: 75-та студентська науково-технічна конференція (м. Харків, 13-15 листопада 2013 р.); 33-тя міжнародна науково-практична конференція «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (м. Харків, 30 жовтня 2020 р.); VII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту» (м. Кременчук, 11-13 листопада 2020 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні технології управління транспортними процесами» (м. Харків, 17-18 листопада 2020 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність на транспорті» (м. Харків, 18-20 листопада 2020 р.); IX наукова конференція «Наукові підсумки 2020 року» (м. Харків, 29 грудня 2020 р.).

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася на розширеному засіданні кафедри управління експлуатаційною роботою УкрДУЗТ.

Публікації. Відповідно до теми дисертації опубліковано 12 наукових праць, з яких чотири статті, опубліковані у фахових наукових виданнях, затверджених МОН України (три статті включено до міжнародних наукометричних баз, дві з них включено до бази Scopus) та дві статті у наукових виданнях інших держав, що входять до ОЕСР (включено до бази Scopus), шість праць апробаційного характеру.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотацій, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Повний обсяг дисертації складає 188 сторінок, з яких обсяг основного тексту – 125 сторінок, 41 рисунок і 27 таблиць за текстом, та 1 таблиці на окремій сторінці, список використаних джерел із 140 найменувань, і 5 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі дослідження, відображено наукову новизну та практичну цінність, подано загальну характеристику роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз умов функціонування залізничного транспорту України при діючій системі закладення резервів часу у графіку руху поїздів. При незмінних технологіях перевезень і відсутності відновлення основних фондів залізнична система України стабільно зменшує обсяги перевезень вантажів. При стабільному тренді падіння вантажної бази зростає час знаходження вагона в русі, що є важливим елементом середнього обороту вантажного вагона. У 2019 році тривалість знаходження вагона на проміжних станціях і в поїздах при русі на залізниці України збільшилась відповідно на 45,2 та 33 % від показників 2007 року. У 2018-2019 роках критично збільшились кількість і тривалість затримок біля світлофорів. Кількість затримок у 2019 році збільшилась у 4,6 рази порівняно з 2015 роком. Виявлено, що затримки в мережі згубно впливають на терміни доставки вантажів, зокрема у грудні 2019 року показник порушення термінів

доставки вантажних відправок на мережі АТ «Укрзалізниця» склав 15792 порушення, тобто в середньому за добу порушувалась доставка у 43,3 відправки. Це свідчить про значні проблеми в системі планування руху поїздопотоків і відсутність достатнього рівня надійності ГРП. Під надійністю в даному дослідженні, згідно ДСТУ 2860-94, розуміється властивість технологічного процесу перевезень встановленого графіком руху поїздів зберігати протягом заданого інтервалу часу (доба) в установлених межах значення точності виконання ГРП, які характеризують здатність виконувати основну функцію – пропуск поїздопотоків через дільницю. Під деталізуючою властивістю надійності розглядається безвідмовність. Порівняльний аналіз закладених величин резервів часу на відновлення в нитках графіка встановлений стандартом UIC 451-1 OR Міжнародного союзу залізниць і діючим методом закладення резервів часу з реальними даними часу резервів у нитках нормативного графіка руху поїздів, довів невідповідність даних нормативних величин з реальними. Це свідчить, що, незважаючи на ключову роль, яку відіграє резервний час у розробленні надійних розкладів, найчастіше на практиці використовується експертний підхід, що не дозволяє обґрунтовано вибрати раціональні параметри величини резерву часу на відновлення руху поїздів різних категорій. З огляду на зазначене вище зроблено висновок, що удосконалення методу визначення резервів часу в нитках графіка на основі автоматизації розрахунків моделювання розповсюдження затримок поїздів дасть можливість підвищити надійність руху поїздопотоків і, як наслідок, змінити негативну динаміку якості операційної роботи залізниці.

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

Вирішенням завдань щодо підвищення точності доставки вантажів, автоматизації розрахунку графіка руху поїздів та його виконання, підвищення надійності графіка при адаптивному керуванні параметрами руху поїздів, визначенням резервів займалися такі вчені як: Т. В. Бутько, Н. А. Воробйов, М. І. Данько, І. В. Жуковицький, А. Д. Каретніков, Д. М. Козаченко, О. В. Лаврухін, Д. В. Ломотько, В. І. Мацюк, В. К. Мироненко, Г. І. Нестеренко, Є. В. Нагорний, С. В. Панченко, В. В. Повороженко, А. В. Прохорченко, Н. А. Самаріна, Є. М. Тішкін, Ю. С. Хандакарова, Н. Ю. Шраменко та ін. З аналізу процедур складання графіка руху поїздів виявлено низку недоліків, одним з яких є відсутність дієвих інструментів моделювання, оптимізації та методів аналізу даних для покращення надійності розкладів за рахунок встановлення резервів. У межах розроблення методів визначення величин резерву часу в нитках графіка важливим є точність прогнозування розповсюдження затримок поїздів у мережі. На основі проведеного аналізу різних підходів до прогнозування розповсюдження затримок поїздів у мережі, виокремлено такі: детермінований, стохастичний, статистичний.

За детермінованим підходом дуже точно можна вивчати реакцію мережі на затримки, але його застосування не дозволяє реалістично оцінити динаміку

поширення затримок у залізничних мережах, у яких повністю або частково відсутній плановий розклад руху поїздів.

Згідно з аналізом, який дозволив виявити переваги та недоліки різних підходів до моделювання, у дисертаційній роботі визначено, що для залізничної системи з частковим дотримання розкладу руху поїздів більш прийнятним і ефективним є застосування макрорівневого підходу до встановлення резервів у нитках на основі моделювання поширення затримок поїздів. Спираючись на дослідження таких вчених, як J. Manitz, K. Frankhuizen, Z. Zeng, B. Monechi та інших, щодо застосування за макрорівневим підходом епідеміологічних моделей для моделювання поширення затримок поїздів, у даній дисертації з метою підвищення точності та швидкості розрахунків продовжено актуальний і перспективний напрям.

У другому розділі проведено дослідження технологічних особливостей завдання пошуку раціональних величин компенсаційного часу в нитках графіка поїздів різних категорій. 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. На рис. 1 наведено один із можливих практичних прикладів застосування операції нагону при виникненні первинної затримки у графіку руху поїздів на умовній двоколінійній дільниці А-Б.

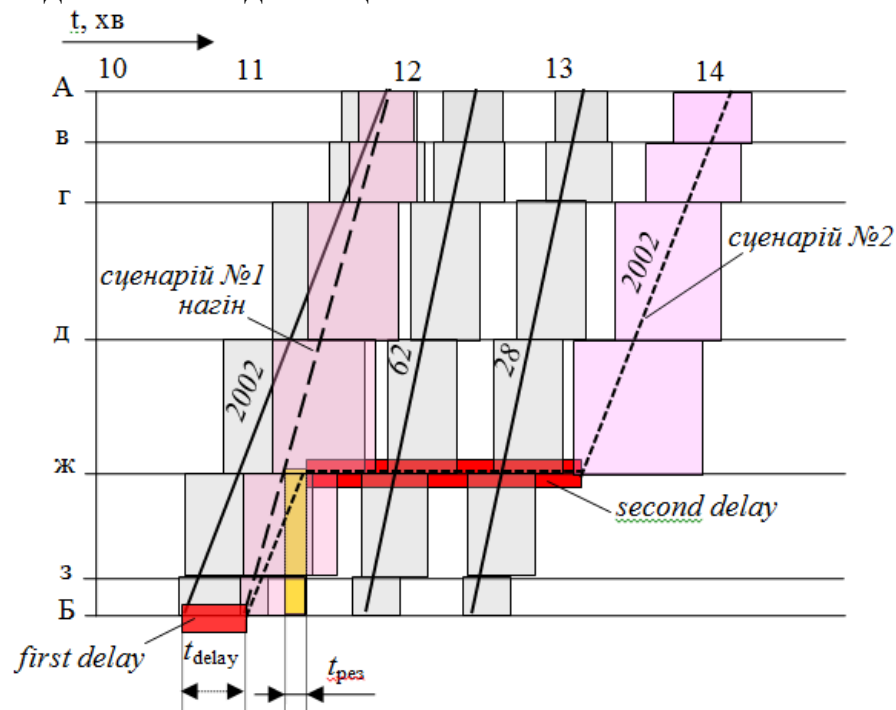


Рисунок 1 – Схема сценаріїв руху поїздів при виникненні затримки на двоколінійній дільниці: сценарій 1 – реалізація операції нагін; сценарій 2 – виконання операції обгону з пасажирськими поїздами

Для вирішення завдання пошуку раціональних величин компенсаційного часу в нитках графіку поїздів різних категорій запропоновано застосувати модифіковану

SIR-модель (Susceptible–Infected–Removed model). Адаптуючи цю модель до задачі впливу величини затримок поїздів на ГРП залізничної мережі, можна представити процес розповсюдження затримки поїздів та пов'язаного впливу на рух поїздів на залізничній мережі як процес розповсюдження інфекційних хвороб. У межах прийнятої постановки задачі загальну кількість ниток поїздів у ГРП слід поділяти умовно на групи: $S(t)$ – чутливі до затримки поїзди, які в момент часу t прямують за графіком, але потенційно можуть бути затримані при русі на дільниці (англ., Susceptible); $I(t)$ – поїзди, що прямують із затримкою та впливають на прямування інших поїздів, передаючи їм затримку (англ. Infected); $R(t)$ – поїзди, що за час прямування через залізничну дільницю з затримкою, поглинули її (виконали нагін), прямують за графіком і не впливають на виникнення затримок подальшому русі (англ., Recovered). На рис. 2 наведено граф переходів між станами запропонованої SIR-моделі, що має три класи або типи поїздопотоків на дільниці ij .

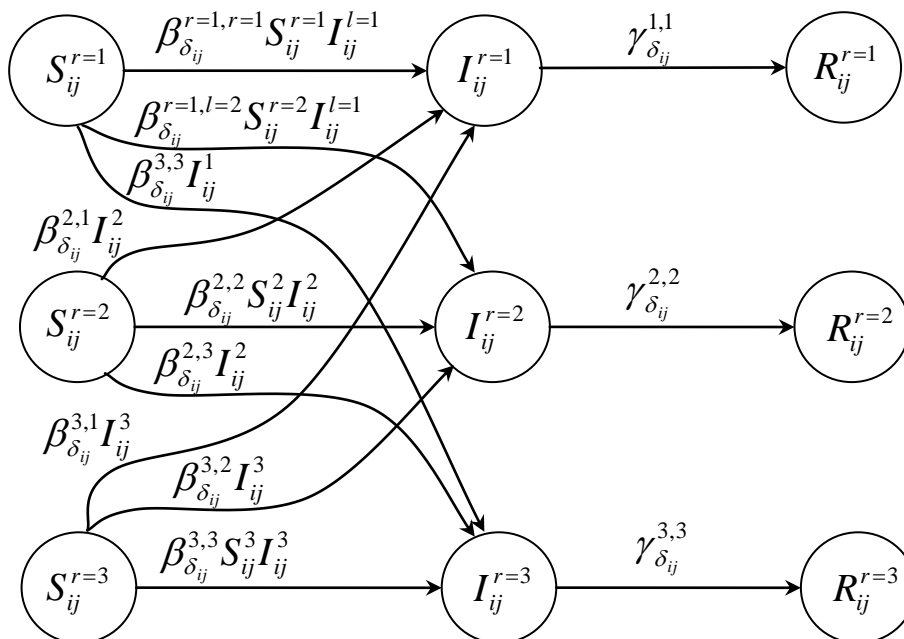


Рисунок 2 – Граф переходів між станами SIR-моделі з групами пасажирських, приміських і вантажних поїздопотоків

Враховуючи важливість урахування 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 цьому дослідженні запропоновано врахувати такі категорії поїздів: $r=1$ – пасажирські поїзди; $r=2$ – приміські поїзди; $r=3$ – вантажні поїзди. Згідно з діючими правилами ПТЕ ієрархія пріоритетності відповідає зазначеній їхній послідовності категорій. Зроблено припущення, що поїзди кожного класу мають однакові характеристики процесів передачі затримки та відновлення руху.

Математичну модель для формалізації процесу розповсюдження затримок поїздів на залізничній дільниці запропоновано записати як систему диференціальних рівнянь вигляду:

$$\begin{cases} \frac{dS^r(t)}{dt} = -\sum_l \beta^{r,l} S^r(t) I^l(t); \\ \frac{dI^r(t)}{dt} = \sum_l \beta^{r,l} S^r(t) I^l(t) - \gamma^r I^r; \\ \frac{dR^r(t)}{dt} = -\gamma^r I^r, \end{cases} \quad (1)$$

де S^r – кількість сприятливих поїздів у класі r на дільниці, поїзди; $\beta^{r,l}$ – швидкість розповсюдження затримки від поїздів класу r до поїздів класу l на дільниці, де $r=l$, $r, l \in R$; I^l – кількість інфікованих поїздів класу l на дільниці, поїзди; R^r – кількість поїздів класу r , що прямували з затримкою, але поглинули її, поїзди; 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 (1) дорівнюють $(S_0^r, I_0^r, 0)$, де S_0^r, I_0^r – кількість сприятливих і затриманих поїздів у класі r на дільниці при $t = 0$ відповідно.

Важливими параметрами системи (1) є швидкість розповсюдження затримки від поїздів $\beta^{r,l}$ і швидкість відновлення затримки в поїздів класу r на дільниці γ^r . У дисертації запропоновано реалізувати настроювання моделі (1) за такою послідовністю: на першому етапі розробити метод для пошуку параметрів $\beta^{r,l}$ на основі даних затримок реальної дільниці, а після провести моделювання та виконати перевірку на точність та адекватність.

Для пошуку параметрів швидкості розповсюдження затримки в системі диференціальних рівнянь (1) у роботі запропоновано використати метод еволюційних обчислень, зокрема бінарний генетичний алгоритм, BGA. Для реалізації оптимізаційної задачі в межах генетичного алгоритму змінні моделі подано у формі хромосоми фіксованої довжини з урахуванням обмежень на діапазони значень і зведенням їх в один числовий вектор $C^h = (\beta^{1,1}, \beta^{1,2}, \beta^{1,3}, \beta^{r,l}, \dots, \beta^{3,3})$, 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 (1) у межах фітнес-функції BGA запропоновано виконати чисельним методом Рунге-Кутта 4-го порядку. Критерієм оцінювання підбору змінних в оптимізаційній задачі застосовано середню абсолютну похибку (MAPE) між емпіричними та модельними результатами. Графік залежності кращих і середніх значень цільової функції F від кількості ітерацій BGA в процесі підбору коефіцієнтів швидкості поширення затримки наведено на рис. 3.

За результатом розв'язання оптимізаційної моделі були знайдені такі коефіцієнти $\beta^{1,1} = 0,0004$; $\beta^{1,2} = 0,0011$; $\beta^{1,3} = 0,0001$; $\beta^{2,1} = 0,0012$; $\beta^{2,2} = 0,1784$; $\beta^{2,3} = 0,0015$; $\beta^{3,1} = 0,0001$; $\beta^{3,2} = 0,0001$; $\beta^{3,3} = 0,0023$.

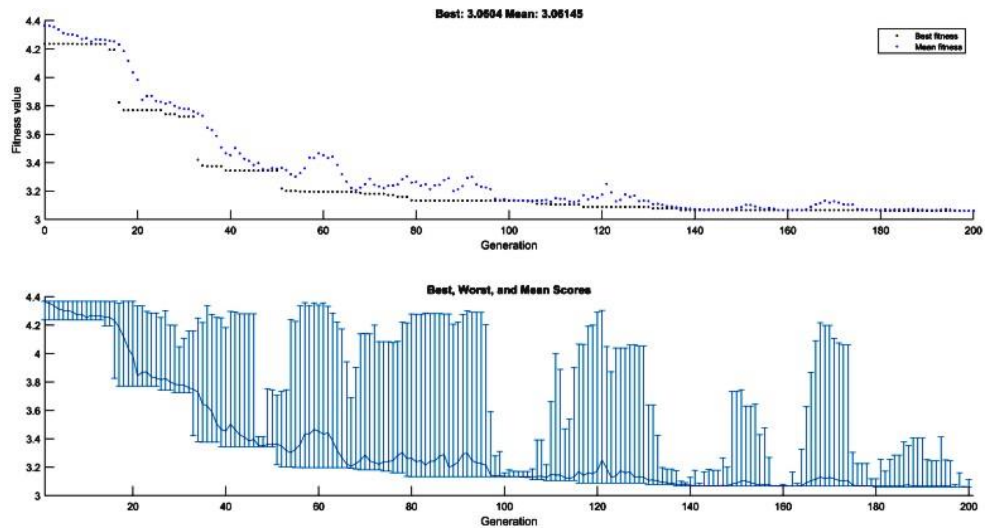


Рисунок 3 – Графік залежності кращих і середніх значень цільової функції F від кількості ітерацій BGA в процесі підбору коефіцієнтів швидкості поширення затримки

Величина коефіцієнтів характеризує вплив одних категорій поїздів на інші, що дозволяє чисельно оцінити взаємовплив поїздів різної пріоритетності у графіку руху поїздів. Середня абсолютна похибка (MAPE) між емпіричними та модельними результатами склала 3 %, що є високим результатом (рис. 4).

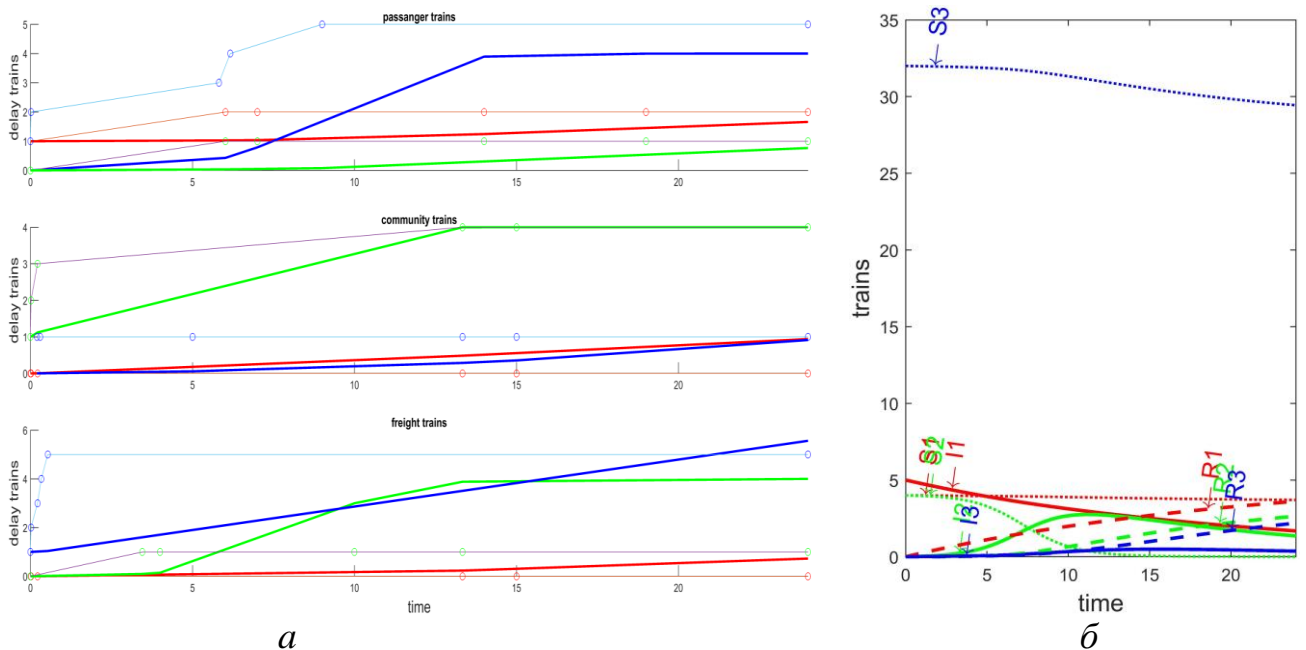


Рисунок 4 – Результати експериментальних розрахунків: a – порівняльний графік динаміки кількості затриманих поїздів між емпіричними та модельними значеннями за трьома сценаріями затримки відповідно до емпіричних даних на розрахунковій дільниці (тонка лінія з колами – емпіричні значення; жирна лінія – модельні значення); b – графік динаміки зміни станів потоків поїздів в умовах відновлення руху поїздів впродовж доби при виникненні затримки п'яти пасажирських поїздів на лінії Л – Л-3 (жирний червоний колір – пасажирські поїзди $r=1$; жирний зелений колір – приміські поїзди $r=2$; жирний синій колір – вантажні поїзди $r=2$)

У третьому розділі розроблено метод на основі моделювання розповсюдження затримок поїздів на розгалужених залізничних полігонах. Для пошуку раціональних резервів часу на відновлення руху поїздів різних категорій залежно від кількості затриманих поїздів у графіку руху на макrorівні функціонування залізничної мережі в роботі запропоновано представити топологію залізничної мережі у вигляді неорієнтованого графу $G(P,E)$, де множина вершин графа P – залізничні станції, на яких виконуються технічні та технологічні операції з обробки поїздопотоків, відповідно до цього їх розглядають обмежуючими для поділу мережі на дільниці 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 дільницям між станціями мережі, де $e_{ij} \in E$, $i, j = \overline{1, n}$ (рис. 5).

Відповідно до заданих розмірів руху кожного потоку поїздів r на мережі існують задані їхні маршрути, величину яких запропоновано записати за допомогою параметра $f^{st,r}$, $s, t \in P$, де s – станція джерела потоку поїздів, t – станція – стік для потоку поїздів. Отже, через $f_{ij}^{st,r}$ – потік поїздів r -го класу по ребру або дільниці e_{ij} , що відповідає кількості поїздів, які прямують із s у t , $f_{ij}^{st,r} > 0$.

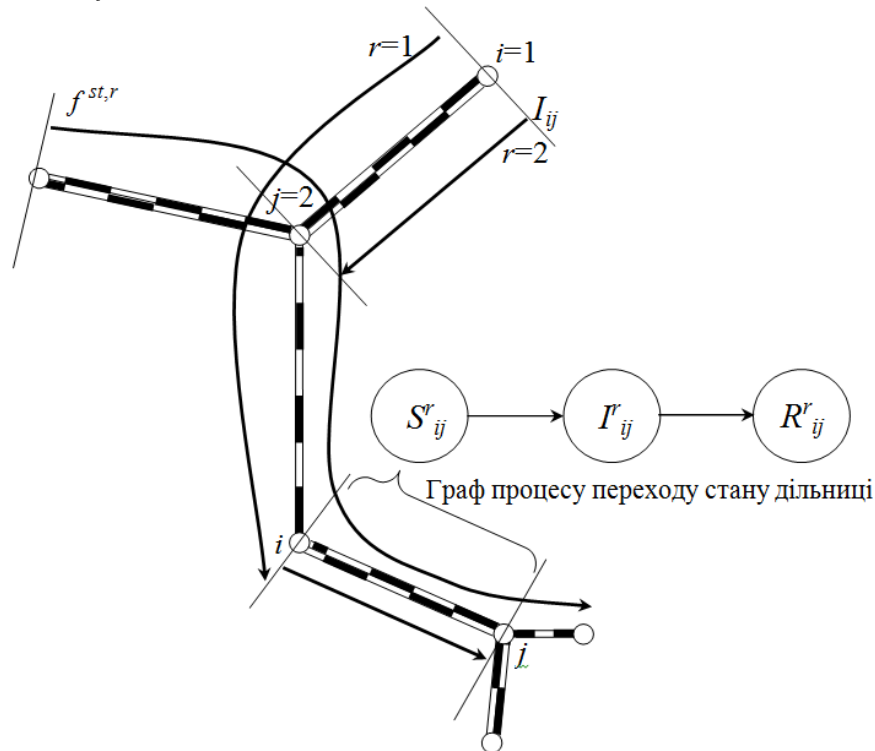


Рисунок 5 – Граф мережі $G(P,E)$, потоки поїздів і представлення процесу переходу стану дільниці відповідно до моделі SIR

Залежно від кількості колій на дільниці типу δ_{ij} (1 – одноколійна, 2 – одноколійно-двоколійна, 3 – двоколійна) запропоновано прив'язати $SIR_{\delta_{ij}}$ -модель з відповідними (заздалегідь настроєними) коефіцієнтами швидкості. Це дозволило

уніфікувати процес побудови SIR-моделей для кожного ребра ij (дільниці) графа та зменшити розмірність задачі.

Для урахування переходу кількості затриманих поїздів на сусідню дільницю графа G запропоновано кількість затриманих поїздів, що прямують як транзитні через вершину j , визначати за коефіцієнтом транзитності – пропорційно загальній кількості затриманих поїздів даного класу r та величині транзитного потоку за виразом

$$I_{jk,transf}^r = \frac{I_{ij}^r \sum N_{ik}^r}{N_{ij}^r}, \quad (2)$$

де $I_{jk,transf}^r$ – кількість затриманих поїздів класу r , що є транзитними для вершини j та прямують на дільницю jk , $j=k$, поїзди; $\sum N_{ik}^r$ – загальний потік поїздів класу r , що прослідуює вершину j в напрямі вершини k , k – номер вершини, що передуює вершині j на ребрі графа G , поїзди; N_{ij}^r – загальна кількість поїздів класу r на дільниці ij , $N_{ij}^r = N = \sum_r f_{ij}^{st,r}$.

Для кожної дільниці з характеристиками інфраструктури типу δ_{ij} запропоновано настроїти відповідну $SIR_{\delta_{ij}}$ -модель за рівняннями (1-3) за допомогою розв'язання оптимізаційної задачі для пошуку коефіцієнтів швидкості $\beta_{\delta_{ij}}^{r,l}$ розповсюдження затримки. Для настроювання моделей запропоновано використати розроблений у другому розділі дисертаційного дослідження метод машинного навчання з використанням BGA для отримання знань з даних щодо розповсюдження стандартної затримки в графіку руху на відповідній дільниці.

У межах експериментальних досліджень у роботі отримано результати поширення затримок на реальних дільницях одного з залізничних полігонів АТ «Укрзалізниця». Граф залізничного полігону з заданими потоками поїздів різних класів r подано на рисунку 6, а. Виконано настроювання двох $SIR_{\delta_{ij}}$ -моделей для восьми залізничних дільниць, з яких дві $SIR_{\delta_{ij}=2}$ -моделі відповідають одноколіійно-двоколіійній інфраструктурі дільниці, а всі інші двоколіійні – $SIR_{\delta_{ij}=3}$ -моделі. Початковою вершиною поширення модельної затримки на графі прийнята станція А. Для автоматичного визначення послідовності запуску систем $SIR_{\delta_{ij}}$ -моделей у напрямі поширення затримки використано алгоритм для перетворення графа полігону у спрямований граф - дерево з вершиною корнем – станція А. Згідно з вибудованою послідовністю розв'язується $SIR_{\delta_{ij}}$ -модель відповідної дільниці, що визначає параметри поширення затримки на графі. На рис. 6, б наведено перетворений граф полігону у спрямоване дерево.

Початкові умови дільниці А-В $I^{r=1}(t=0) = 4$ поїзди; $I^{r=2}(t=0) = 0$ поїздів та $I^{r=3}(t=0) = 5$ поїздів. Застосовані такі коефіцієнти відновлення затримки в поїздів класу r на дільниці: $\gamma^{r=1} = \frac{1}{20 \text{ хвилини}} = 0,05$; $\gamma^{r=2} = 0,0667$; $\gamma^{r=3} = 0,10$.

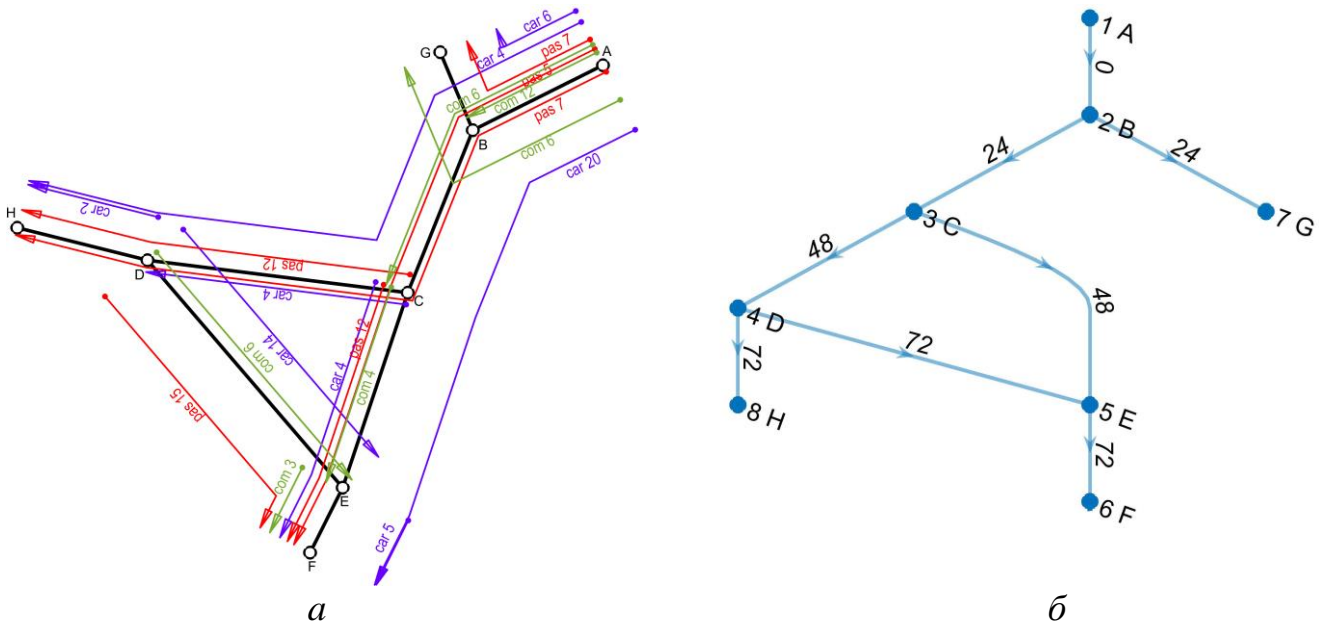


Рисунок 6 – Візуалізація вихідних даних для експериментальних досліджень:
 а – граф залізничного полігону з візуалізацією потоків поїздів різних класів;
 б – граф-дерево з коренем у вершині А для послідовного розв’язання $SIR_{\delta ij}$ -моделей

Візуалізація графіків динаміки зміни станів потоків поїздів в умовах відновлення руху поїздів на ділянках залізничного полігону при виникненні затримок за відправленням на станції А наведено на рис. 7.

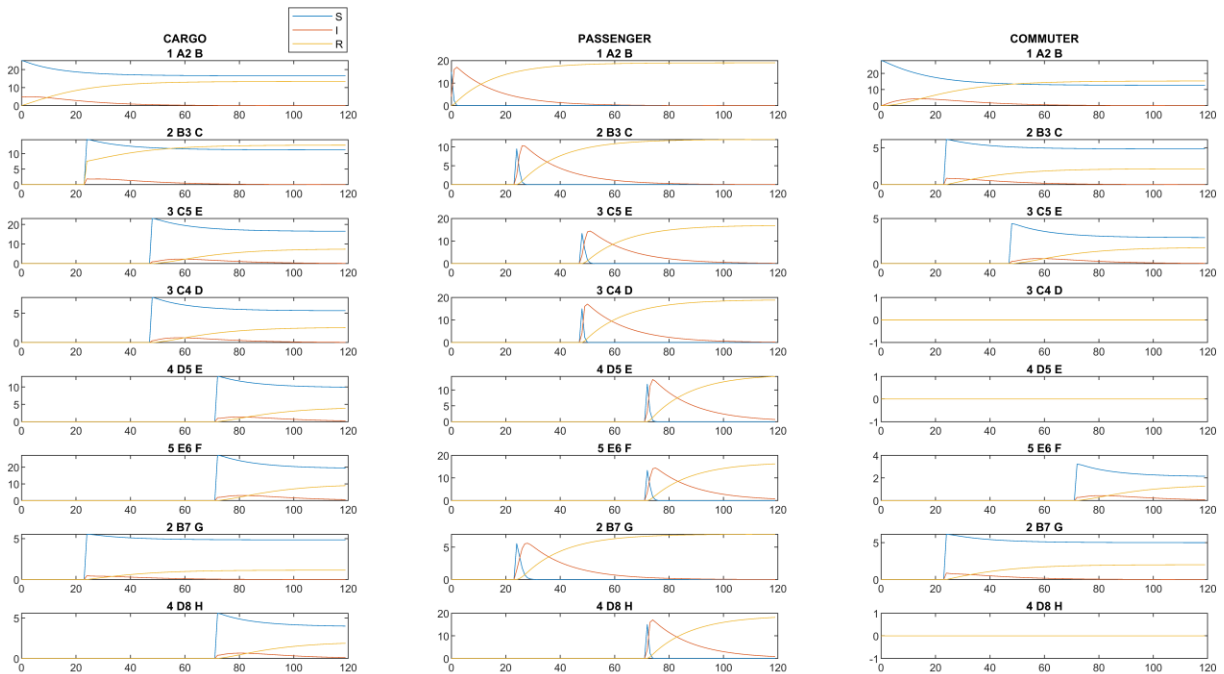


Рисунок 7 – Графіки динаміки зміни станів потоків поїздів в умовах відновлення руху поїздів на ділянках залізничного полігону при виникненні затримок за відправленням на станції А: жовтий колір – поїзди, що чутливі до затримки; синій колір – затримані поїзди; помаранчевий колір – поїзди, що відновили рух

За результатами моделювання вперше чисельно визначено вплив «мережевого ефекту» на надійність руху поїздопотоків на розгалуженому залізничному полігоні. Доведено, що виникнення одночасної первинної затримки в пасажирських і вантажних поїздах на початку руху по станції А найбільш згубно впливає на приміські поїзди на всіх ділянках полігону, що досліджувався. Отримані кількісні результати дозволили виявити недоліки у встановленні величин резервів часу на ділянці E-F та суміжній з нею D-E – закладений резервний час для поїздів не дозволяє відновити рух. Результати моделювання підтвердили адекватність отриманих розв'язків, що перевірено за критерієм узгодженості Пірсона. Похибка між емпіричними та модельними результатами складає до 10 % в умовах швидких розрахунків. Для визначення раціональних резервів часу в нитках графіка запропоновано виконувати вибір альтернативних стратегій закладених резервів, спираючись на оцінювання надійності ГРП за розрахунком коефіцієнта готовності для кожної ділянки полігону. Вибір найбільш прийнятної стратегії закладення резервів реалізовано у вигляді статистичної гри за декількома критеріями вибору.

У четвертому розділі запропоновано вимоги до автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу в нитках графіка для підвищення швидкості та якості складання нормативного графіка руху поїздів на залізниці України. Попередньо проаналізовано діючі програмні продукти для складання графіків руху поїздів в АТ «Укрзалізниця» та запропоновано інтегрувати дані програми в межах єдиного інформаційного середовища з урахуванням удосконаленої процедури визначення резервів часу в нитках графіка на основі розробленого комплексу математичних моделей. Розроблено рекомендації застосування удосконаленого методу визначення резервів часу в нитках графіка на основі моделювання розповсюдження затримок поїздів при складанні ГРП в межах реалізації планування перевезень за розкладом руху маршрутних поїздів (РРМП) і впровадження експерименту з доступу приватних локомотивів до залізничної інфраструктури загального користування. 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 графіку нормативного ГРП до введення їх у дію.

З метою економічного обґрунтування впровадження розробленої в дисертаційному дослідженні автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу в нитках графіка проведено розрахунки. Очікується, що загальна сума економічного ефекту з наростаючим підсумком за п'ять років в умовах підвищення надійності графіка руху поїздів і зменшення впливу затримок на величину складової елементу знаходження вагона в русі в межах загального обороту на основі запровадження автоматизованої підсистеми встановлення раціональних резервів часу у нитках графіка на залізниці України економічна ефективність з наростаючим підсумком за період 2021-2025 рр. може становити близько 566 млн. грн., середній оборот вантажного вагона зменшиться на 3,23% у порівнянні з діючою технологією.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі удосконалено метод визначення резервів часу в нитках графіка з використанням моделювання розповсюдження затримок поїздів. Це дозволить підвищити швидкість і якість складання нормативного графіка руху поїздів для залізничних систем без дотримання розкладу відправлення вантажних поїздів, зокрема залізниці 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. Основні результати та висновки полягають у наступному:

1. Аналіз умов функціонування залізничного транспорту України при діючій системі закладення резервів часу у 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. У 2019 році тривалість знаходження вагона на проміжних станціях і в поїздах при русі на залізниці України збільшилась відповідно на 45,2 та 33 % від показників 2007 року. Кількість затримок у 2019 році збільшилась в 4,6 рази у порівняно з 2015 роком. Виявлено, що затримки в мережі згубно впливають на терміни доставки вантажів, зокрема у грудні 2019 року в середньому за добу порушувалась доставка у 43,3 вантажної відправки. Це свідчить про значні проблеми в системі планування руху поїздопотоків і відсутність достатнього рівня надійності ГРП.

2. Порівняльний аналіз закладених величин резервів часу на відновлення у нитках графіку встановлений стандартом UIC 451-1 OR Міжнародного союзу залізниць з діючим нормативним методом закладення резервів часу довів заниження даних величин для вантажних поїздів на 22,5%; для пасажирських – завищення на 50,8%; для приміських – заниження на 84,1%. Паралельний аналіз різниць величин стандарту UIC 451-1 OR з реальними даними часу резервів у нитках нормативного графіка руху поїздів довів заниження даних величин для вантажних поїздів на 11,8%; для пасажирських – завищення на 78,5%; для приміських – заниження на 0,99%. На основі дослідження процедури складання нормативних графіків руху поїздів визначено, що незважаючи на ключову роль, яку відіграє резервний час у розробленні надійних розкладів, найчастіше на практиці використовується експертний підхід, що не дозволяє обґрунтовано вибрати раціональні параметри величини резерву часу на відновлення руху поїзді різних категорій. З огляду на вище зазначене та проведений аналіз теоретичних і практичних досліджень щодо підвищення надійності графіку руху поїздів в залізничних системах світу, зроблено висновок, що удосконалення методу визначення резервів часу у нитках графіку на основі автоматизації розрахунків моделювання розповсюдження затримок поїздів надасть можливість підвищити надійність руху поїздопотоків і, як наслідок, змінити негативну динаміку якості операційної роботи залізниці.

3. Для формалізації процесу розповсюдження затримок поїздів на залізничній дільниці розроблено модифіковану математичну епідеміологічну SIR-модель, яка

дозволяє 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 отримання 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.

4. 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. Цей метод дозволяє врахувати поширення первинної затримки у просторі і часі за рахунок представлення топології залізничної мережі у вигляді неорієнтованого графа з прив'язкою до ребра графа математичної системи диференціальних рівнянь SIR-моделі. Це дозволяє пришвидшити точність складних і тривалих розрахунків поширення затримок поїздів з урахуванням впливу «мережевого ефекту».

5. 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 діючих 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) та розробленні ниток для доступу приватних локомотивів до залізничної інфраструктури АТ «Укрзалізниця». Через це розроблено 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 графіку нормативного ГРП до введення їх у дію.

6. Економічне обґрунтування запропонованих заходів доводить, що від підвищення надійності графіку руху поїздів та зменшення впливу затримок на тривалість руху вагонів в поїздах на основі запровадження автоматизованої підсистеми встановлення раціональних резервів часу у нитках графіка на залізниці України економічна ефективність з наростаючим підсумком за період 2021-2025 рр. може становити близько 566 млн. грн., середній оборот вантажного вагона зменшиться на 3,23% у порівнянні з діючою технологією.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні наукові праці:

Публікації в науковому фаховому виданні України категорії «Б», що включене до міжнародних наукометричних баз:

1. 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. № 193. С. 41-50. (видання індексується у базі *Index Copernicus*).

2. Прохорченко А. В., Кравченко М. А., Гурін Д. О. Дослідження впливу технології перевезень вантажів за розкладом руху на макропоказники залізничної системи України. *Збірник наукових праць ДУІТ*. Серія «Транспортні системи і технології». 2020. № 36. С. 184-198. doi:10.32703/2617-9040-2020-36-19 (видання індексується в базі *OpenAIRE, Index Copernicus, OUCI, DOIJ, ULRICHSWEB*).

Публікація у виданні іншої держави, що входить до Організації економічного співробітництва та розвитку та включене до міжнародних наукометричних баз:

3. 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*. Vol. 1002. 2020. 012016. doi:10.1088/1757-899X/1002/1/012016 (видання індексується у базі *Scopus*).

4. Prokhorchenko A., Malakhova, O., Gurin, D., Sikonenko, G., Prokhorchenko, G. Development of a methodology for determining an energy efficient technology for the freight transportation on a singletrack railway line. *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*. Vol.1021(1). 2021. 012009. doi:10.1088/1757-899X/1021/1/012009 (видання індексується у базі *Scopus*).

Публікації у фаховому виданні України категорії "А", що включене до міжнародних наукометричних баз:

5. Panchenko A., Prokhorchenko A., Panchenko S., Dekarchuk O., Gurin D., Medvediev I. Predicting the estimated time of cargo dispatch from a marshaling yard. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 4, Issue 3 (106). P. 6-15. doi: 10.15587/1729-4061.2020.209912 (видання індексується в базі *Scopus Q2*).

6. 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, Issue 3 (108). P. 6-13. doi: 10.15587/1729-4061.2020.219285 (видання індексується у базі *Scopus Q2*).

Праці апробаційного характеру:

7. Гурін Д. О. Аналіз технології організації місцевої роботи дільниць. 75 студентська науково-технічна конференція (м. Харків, 13-15 листопада 2013 р.). Тези 75 студентської науково-технічної конференції. Збірник наукових праць студентів та магістрів. 2013. С. 208-209.

8. Гурін Д. О. Дослідження впливу величини резерву часу на надійність графіку руху поїздів на основі епідеміологічної SIR-моделі. 33-тя Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (м. Харків, 30 жовтня 2020 р.). Тези стендових доповідей та виступів учасників конференції. Журнал Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. (додаток). 2020. С. 56.

9. Гурін Д. О. Моделювання розповсюдження затримок поїздів в залізничних мережах без дотримання розкладу руху вантажних поїздів. VII

Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту». Матеріали конференції. (м. Кременчук, 11-13 листопада 2020 р.) – Кременчук: КрНУ, 2020. С. 149-150.

10. Гурін Д. О. Розробка вимог до автоматизованої системи прогнозування затримок поїздів в залізничній мережі України. *I Міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні технології управління транспортними процесами»*. Секція «Інтелектуальні технології управління транспортними процесами» (м. Харків, 17-18 листопада 2020 р.). Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні технології управління транспортними процесами», ХНАДУ. 2020. С. 107.

11. Прохорченко А. В., Малахова О. А, Гурін Д. О., Сіконенко Г. М., Прохорченко Г. О. Розробка методики визначення енергоефективної технології перевезень вантажів на одноколінійній залізничній ділянці. *Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність на транспорті»*. Секція 3 “Енергоефективність рухомого складу та перевезень”. (м. Харків, 18-20 листопада 2020 р.). Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Енергоефективність на транспорті». – Харків: УкрДУЗТ, 2020. С. 40.

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

АНОТАЦІЯ

Гурін Д. О. Удосконалення методу визначення резервів часу у нитках графіку на основі моделювання розповсюдження затримок поїздів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.01 – «Транспортні системи» (275 – Транспортні технології). – Український державний університет залізничного транспорту, МОН України, Харків, 2021.

Дисертацію присвячено питанню підвищення надійності та ефективності перевезень на залізничному транспорті України на основі удосконалення методу визначення резервів часу в нитках графіка з використанням моделювання розповсюдження затримок поїздів. Формалізовано процес розповсюдження затримок поїздів на залізничній ділянці на основі модифікації математичної епідеміологічної SIR-моделі, яка дозволяє чисельно оцінити швидкість впливу поїздів різних категорій і величини їхніх резервів компенсації часу при русі на надійність нормативного графіка руху поїздів. На основі розробленої SIR-моделі сформовано метод моделювання розповсюдження затримок поїздів на розгалужених залізничних полігонах для пошуку раціональних резервів часу на відновлення руху поїздів різних категорій залежно від кількості затриманих поїздів у графіку руху. Цей метод дозволяє врахувати поширення первинної затримки у просторі і часі за рахунок представлення топології залізничної мережі у вигляді неорієнтованого графа з прив'язкою до ребра графа математичної системи

диференціальних рівнянь SIR-моделі. Це дозволяє пришвидшити точність складних і тривалих розрахунків поширення затримок поїздів з урахуванням впливу «мережевого ефекту».

Для практичного застосування запропоновано вимоги до створення автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу в нитках графіка на основі запропонованого комплексу математичних моделей для можливості промислової реалізації програмних інструментів для визначення величин резервів часу у нормативних графіках руху поїздів до введення їх у дію.

Ключові слова: залізниця, мережа, графік руху поїздів, поширення затримки, епідеміологічна модель, SIR.

АННОТАЦІЯ

Гурин Д. О. Совершенствование метода определения резервов времени в нитках графика на основе моделирования распространения задержек поездов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктор философии) по специальности 05.22.01 – транспортные системы (275 – Транспортные технологии). – Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, МОН Украины, Харьков, 2021.

Диссертация посвящена вопросу повышения надежности и эффективности перевозок на железнодорожном транспорте Украины на основе совершенствования метода определения резервов времени в нитках графика с использованием моделирования распространения задержек поездов. Формализован процесс распространения задержек поездов на железнодорожном участке на основе модификации математической эпидемиологической SIR-модели, которая позволяет численно оценить скорость воздействия поездов различных категорий и величины их резервов компенсации времени при движении на надежность нормативного графика движения поездов. На основе разработанной SIR-модели сформирован метод моделирования распространения задержек поездов на разветвленных железнодорожных полигонах для поиска рациональных резервов времени на восстановление движения поездов различных категорий в зависимости от количества задержанных поездов в графике движения. Этот метод позволяет учесть распространение первичной задержки в пространстве и времени за счет представления топологии железнодорожной сети в виде неориентированного графа с привязкой к ребру графа математической системы дифференциальных уравнений SIR-модели. Это позволяет ускорить точность сложных и длительных расчетов распространения задержек поездов с учетом влияния «сетевых эффектов».

Для практического применения предложены требования к созданию автоматизированной подсистемы определения рациональных резервов времени в нитках графика для возможности промышленной реализации программных инструментов для определения величин резервов времени в нормативных графиках движения поездов до введения их в действие.

Ключевые слова: железная дорога, сеть, график движения поездов, распространение задержки, эпидемиологическая модель, SIR.

ABSTRACT

D. Gurin. Improving the method of determining time reserves in the schedule threads based on modeling the propagation of train delays – Manuscript.

Dissertation for a for the degree of Candidate of Technical Science (PhD in technical sciences) in specialty 05.22.01 – “Transport systems” (275 - Transport technologies). - Ukrainian State University of Railway Transport, MES of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to the question of increase of reliability and efficiency of transportations on the railway transport of Ukraine on the basis of perfection of a method of definition of time reserves in threads of the schedule with use of modeling of distribution of delays of trains.

The analysis of the conditions of functioning of the railway transport of Ukraine under the current system of setting time reserves in the train schedule revealed that with a stable trend of falling freight base decreases the average speed of the car in the network. It was found that delays in the network have a detrimental effect on the delivery time of goods. This indicates significant problems in the system of planning the flow of trains and the lack of a sufficient level of reliability of the train schedule. One of the ways to increase the reliability of train traffic is to improve the method of determining time reserves in the schedule on the basis of automation of calculations of modeling the propagation of train delays.

In the dissertation work for railway systems without observance of the schedule of departure of freight trains the procedure of definition of time reserves in schedule threads on the basis of modeling of distribution of delays of trains of different categories is theoretically substantiated. The process of spreading train delays at the railway station has been formalized on the basis of a modification of the mathematical epidemiological SIR-model, which allows to numerically assess the speed of trains of different categories and the size of their reserves to compensate for the reliability of the normative train schedule. This macro-level approach to modeling the propagation of train delays involves the application of machine learning to gain knowledge of real train delays at the site when searching for parameters of differential equations of the SIR model and modeling the propagation of delay with different speeds.

Based on the developed SIR-model, a method of modeling the propagation of train delays at branched railway landfills for finding rational time reserves for the resumption of trains of different categories depending on the number of delayed trains in the schedule is formed. This method allows to take into account the propagation of the primary delay in space and time by representing the topology of the railway network in the form of an undirected graph with reference to the edge of the graph of the mathematical system of differential equations of the SIR model. This allowed to unify the process of building SIR-models for each section of the network graph and reduce the dimension of the problem. To account for the impact of the “network effect”, it is proposed to determine the transit coefficient for each station of the station. This factor allows you to calculate the number of detained trains to adjacent sections. To adjust the SIR-models, it is proposed to use empirical data on the distribution of the average delay in the normative schedule of traffic in the relevant section. The developed method of modeling the

propagation of train delays on branched railway tracks allows to accelerate the accuracy of complex and lengthy calculations of the spread of train delays taking into account the impact of the "network effect".

For practical application, the requirements for the creation of an automated subsystem for determining rational time reserves in the graphics are proposed on the basis of the proposed set of mathematical models for the possibility of industrial implementation of software tools for determining time reserves in normative train schedules before putting them into operation. Recommendations for the application of an improved method for determining time reserves in the schedule threads based on modeling the distribution of train delays in the preparation of fracturing in the implementation of scheduled scheduling and the introduction of an experiment on access of private locomotives to public railway infrastructure.

Key words: railway, network, train schedule, delay propagation, epidemiological model, SIR.

ГУРІН ДМИТРО ОЛЕГОВИЧ

УДК 656.222.5

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ РЕЗЕРВІВ ЧАСУ У НИТКАХ
ГРАФІКУ НА ОСНОВІ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ
ЗАТРИМОК ПОЇЗДІВ**

05.22.01 – транспортні системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск



доц. Малахова О. А.

Підписано до друку "18" березня 2021 р.
Формат паперу 60×84 1/16. Папір для множних апаратів.
Умовн. – рук. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 1,1
Тираж 100 прим.

Надруковано у копіцентрі «Panda-Print»
(ФОП Панарін В.С.)
61050, м. Харків, м. Фейєрбаха, 11-б