

Розробка методу моделювання розповсюдження затримок поїздів в залізничних мережах за допомогою епідеміологічних SIR-моделей

Д. О. Гурін, А. В. Прохорченко, М. А. Кравченко, Г. В. Шаповал

Розроблено метод моделювання розповсюдження затримок поїздів на розгалужених залізничних полігонах за допомогою модифікованих епідеміологічних SIR-моделей. Дані моделі враховують взаємовплив поїздів з різним пріоритетом в потоці. Це дозволяє врахувати гетерогенну динаміку при поширенні затримок між поїздопотоками різної пріоритетності. Для врахування поширення первинної затримки у просторі і часі запропоновано представити топологію залізничної мережі у вигляді неорієнтованого графу з прив'язкою до ребра графу математичної системи диференційних рівнянь SIR-моделі. Це дозволило уніфікувати процес побудови SIR-моделей для кожного ребра (дільниці) графу мережі та зменшити розмірність задачі. Для обліку впливу “мережевого ефекту” запропоновано визначити транзитний коефіцієнт за кожною станцією дільниці. Даний коефіцієнт дозволяє вирахувати кількість затриманих поїздів на суміжні дільниці. Для настроювання SIR-моделей запропоновано використати емпіричні дані щодо розповсюдження середньої затримки в нормативному графіку руху на відповідній дільниці. Для послідовного розв'язку SIR-моделей, що відповідають взаємопов'язаним дільницям мережі, застосовано алгоритм, який перетворює граф мережі на спрямоване дерево, коренем якого є станція виникнення затримки. Проведені дослідження моделювання поширення затримок поїздів на залізничному полігоні з врахуванням взаємовпливу різних категорій поїздів в потоці та закладених резервів часу на відновлення руху. Отримані результати моделювання підтвердили адекватність рішень та дозволяють кількісно оцінити вплив первинних затримок та величин резерву часу в розкладах руху поїздів різних категорій на надійність нормативного графіка руху поїздів.

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

1. Вступ

Для залізничних систем, що відносяться до мережних галузей з високими постійними витратами, важливим є підвищення використання пропускної спроможності мережі для зменшення середньої вартості послуг з перевезень вантажів та пасажирів. Ступінь використання пропускної спроможності дільниць залізничної мережі або навіть її перевантаження залежить від системних властивостей надійності та стійкості графіка руху поїздів. В умовах щоденних операцій з поїздами виникають екзогенні затримки поїздів, які спричиняють поширення затримки між іншими поїздами в мережі. Не зважаючи на важливість знання параметрів поширення таких затримок у залізничній мережі, методів, що дозволяють оцінити вразливість залізничної системи, все ще бракує. Особливої складності набуває таке

завдання для залізничних систем, в яких виконується змішаний рух пасажирських і вантажних поїздів на одній інфраструктурі, а більша частина вантажних поїздів не дотримується розкладу руху. Це унеможлиблює проведення деталізованих розрахунків поширення затримок на діючих розкладах руху поїздів. Саме тому, вивчення складних динамічних процесів розповсюдження послідовних затримок поїздів на макрорівні функціонування залізничної мережі є актуальним і досить перспективним напрямом досліджень.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Досліджень, присвячених вивченню проблеми поширення затримок поїздів в залізничних мережах, існує досить багато. Найбільше наукових робіт присвячено вивченню даної проблеми для залізничних систем з дотриманням розкладу руху та якісним його аналізом. В першу чергу це пов'язано з можливістю проведення деталізованих розрахунків впливу різних видів затримок у запланованих графіках руху поїздів (planned schedule) [1]. Саме детермінований підхід до розрахунку поширення затримки у плановому графіку руху поїздів був запропонований у роботі [2]. Запропонований алгоритм був перевірений на графіках руху Deutsche Bahn AG і довів свою ефективність при великих обсягах обчислень. До детермінованого підходу можна віднести дослідження [3]. В даній роботі представлено модель та алгоритм на основі лінійної системи на базі тах-плюс алгебри для обчислення поширення первинних затримок за періодичним розкладом руху поїздів (periodic railway timetable). Динаміка поширення затримки аналізується залежно від таких властивостей розкладу, як: відновлюваність та стабільність (realisability and stability).

За детермінованим підходом дуже точно можна вивчати реакцію мережі на затримки. Однак його застосування не дозволяє реалістично оцінити динаміку поширення затримок для залізничних мереж, в яких повністю або частково відсутній плановий розклад руху поїздів. 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. Причиною цього є не прогнозованість в часі та просторі утворення вантажопотоків. Як наслідок, вантажні поїзди зі станцій формування відправляються "за готовністю". Дана технологія передбачає, що після проведення всіх необхідних технічних та комерційних операцій з составом поїзда на сортувальних станціях диспетчерський персонал приймає рішення про відправлення поїзда. Поїзд відправляється, коли дотримується нормативний мінімальний інтервал між поїздами та у наявності найближче вільне часове вікно для слідування даного поїзда.

В таких умовах поїздопотоки слідують 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 [4, 5].

Окремо слід виділити стохастичний підхід до моделювання поширення затримок [6]. В роботі [7] запропонована стохастична математична модель для імітації поширення затримок пасажирських поїздів з урахування пересадок па-

сажирів на залізничній мережі Німеччини. Таку модель за детальною класифікацією можна віднести до мікрорівневого підходу, коли для моделювання необхідний плановий графік руху поїздів. Це не дозволяє її застосовувати для систем без дотримання розкладу руху. Тобто, для моделювання динаміки поширення затримок вантажних поїздів на мережі без дотримання розкладу та при змішаному їх русі з пасажирськими поїздами на лінії. До мікрорівневого підходу можна віднести й роботу [8]. Більш адекватним в таких умовах функціонування залізничної мережі є застосування макрорівневого підходу до формування стохастичних моделей поширення затримок. Наприклад, в роботі [9] 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. Наприклад, робота [10] присвячена аналізу виконання графіка руху поїздів на мережі інфраструктурної компанії DB Netze AG за допомогою використання методів аналізу Big Data. У [11] 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 [12] 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. Це не надає можливості отримати реакцію залізничної мережі у випадку виникнення затримок, які були відсутні в періоді, що досліджувався.

Важливим є напрям досліджень щодо факторного аналізу причин та параметрів поширення затримок поїздів. У роботі [13] 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 [14]. Автори зазначають велику перспективність застосування методів аналізу на основі машинного навчання (ML).

Виходячи з умов об'єкту, що досліджується, запропоновано застосувати макроскопічний підхід 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” [15]. Спираючись на розвиток методів аналізу складних мереж, вже існують дослідження спрямовані на формалізацію динаміки поширення затримок поїздів на топологіях великих мереж [16, 17]. Результативними є дослідження, спрямовані на представлення характеристик процесів поширення інфекційних захворювань подібними до поширення затримок. Як приклад, можна навести роботи в галузі авіаційного транспорту [18], 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 [19] 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 пропускної 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 [20] 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 [21] використано модель SIR для імітації поширення затримки по всій залізничній транзитній мережі Нідерландів (the Dutch transit network). 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. В роботі [22] застосовано SIR модель для дослідження перевантажень в пасажирській міській залізничній мережі та кількісно оцінено вплив різних факторів, зокрема пропускної спроможності на швидкість поширення затримки.

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 та врахування динаміки поширення затримок в залізничній мережі з частковим дотриманням розкладу руху поїздів доцільним є проведення досліджень за допомогою застосування макрорівневого підходу. Одним із перспективних напрямів є застосування модифікацій епідеміологічних моделей.

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є підвищення якості складання нормативних графіків руху поїздів на основі розробки методу моделювання розповсюдження затримок поїздів в залізничних мережах без дотримання розкладу руху на основі макрорівневого підходу.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі дослідження:

- формалізувати процес розповсюдження затримок поїздів на розгалужених залізничних полігонах за допомогою епідеміологічної SIR-моделі;
- провести експериментальні дослідження поширення затримок поїздів на залізничному полігоні з врахуванням взаємовпливу різних категорій поїздів в потоці та закладених резервів часу на відновлення руху.

4. Розробка методу моделювання розповсюдження затримок поїздів в залізничних мережах

4.1. Просторове представлення проблеми розповсюдження затримок поїздів в залізничній системі

В межах вирішення поставленого завдання щодо моделювання розповсюдження затримок поїздів на макрорівні функціонування залізничної мережі в роботі запропоновано представити топологію залізничної мережі у вигляді неорієнтованого графу $G(P, E)$. Множина вершин графа P – відповідають залізничним станціям, на яких виконуються технічні та технологічні операції з обробки поїздопотоків. Відповідно, їх розглядають обмежуючими для поділу мережі на дільниці з однакою 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. 1). Відповідно, їх розглядають обмежуючими для поділу мережі на дільниці з однакою 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. 1).

Враховуючи специфіку технологічних операцій та пріоритетності руху важливо врахувати різні типи потоків поїздів: пасажирський, приміський та вантажний рух. Отже, позначимо через r – тип поїздопотоків, $r=1, 2, 3$. Відповідно до заданих розмірів руху кожного потоку поїздів r на мережі існують задані їх маршрути. Кількість поїздів в потоці запропоновано записати за допомогою параметра $f_{ij}^{st,r}$, $s, t \in P$, де s – станція джерела потоку поїздів, t – станція стік для потоку поїздів. Отже, через $f_{ij}^{st,r}$ – потік поїздів r -го типу по ребру або дільниці e_{ij} , що відповідає числу поїздів, які прямують із s у t , $f_{ij}^{st,r} > 0$. Для спрощення представлення занумеруємо кожен маршрут $\langle s, t \rangle$ параметром μ . Кожен маршрут поїздопотоків r із пункту відправлення s до пункту прибуття t можна представляти впорядкованою множиною ребер: $\mu = (e_{ij}, \dots, e_{ij})$, $\forall e_{ij} \in \mu$. Тоді $f_{ij}^{\mu,r}$ – це число поїздів r -того потоку на маршруті μ , що слідує через дільницю e_{ij} .

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

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{одноколійна} & \text{дільниця } ij, \\ 2, & \text{одноколінно-двоколійна} & \text{дільниця } ij, \\ 3, & \text{двоколійна} & \text{дільниця } ij. \end{cases}$$

Для опису можливостей щодо пропуску кількості поїздів через дільницю ребрам присвоєно параметр $N_{\delta ij}^{\max}$, що відповідає наявній пропускній спроможності дільниці в напрямку руху ij [23, 24].

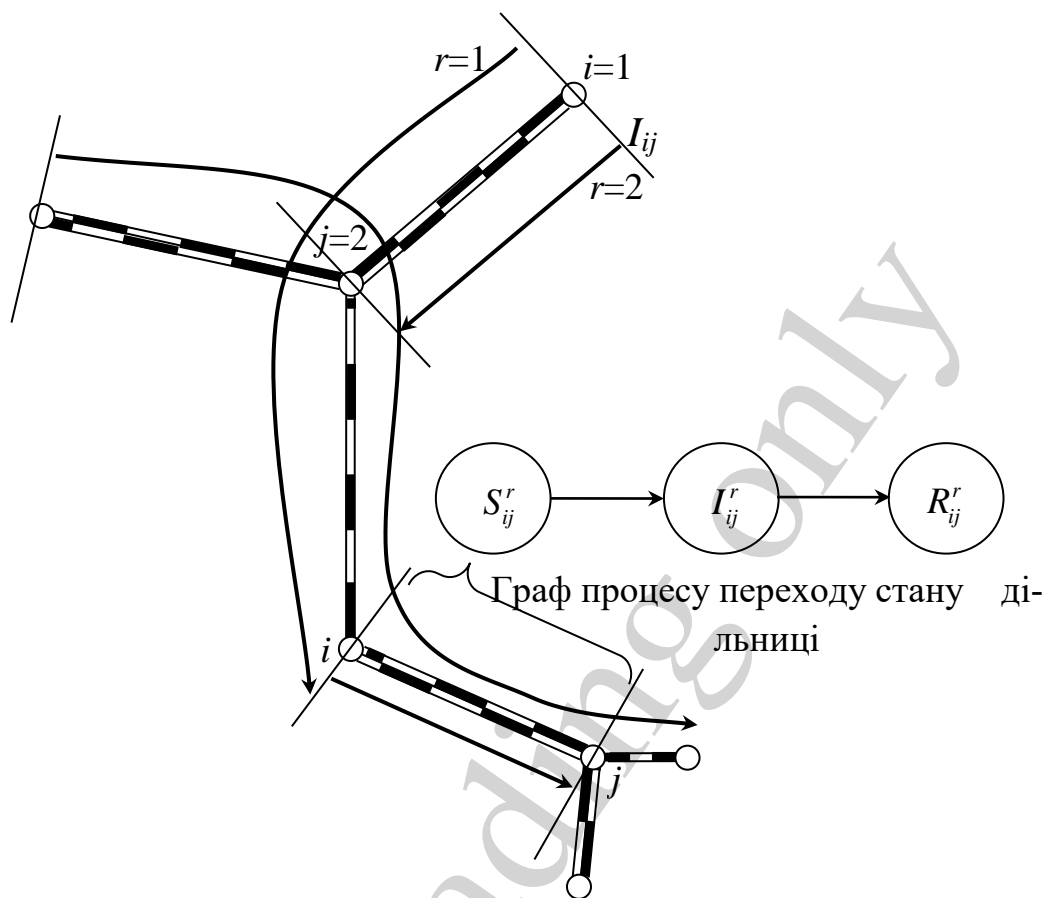


Рис. 1. Граф мережі $G(P, E)$, потоки поїздів та представлення процесу переходу стану дільниці відповідно до моделі SIR

4. 2. Епідеміологічна математична модель розповсюдження затримок поїздів на графі залізничної мережі

На макрорівні залізничної мережі динаміку процесу розповсюдження затримок поїздів в мережі можна уявити як неперервний хвилеподібний процес, який може розвиватись з різною амплітудою. Подібну динаміку можна описати математичними моделями розповсюдження інфекційних захворювань, що досить давно застосовуються в медицині [25–27]. З класичних математичних моделей епідеміології в даній роботі запропоновано застосувати SIR-модель (англ., “Susceptible-Infected-Recovered model”), яка описує епідею з одужанням. При адаптації даної моделі до задачі моделювання динаміки поширення затримки можна представити процес розповсюдження інфекційних хвороб через зараження та одужання. В даному разі зараження – це процес розповсюдження затримок поїздів, а одужання можна розглядати як відновлення руху після затримки. Таким чином, загальну кількість поїздів різних типів на дільниці слід умовно розділяти на сприйнятливих до захворювання (англ., Susceptible), інфікованих (англ., Infected) та видужалих (англ., Recovered). Отже, сприятливі це

$S(t)$ – чутливі до затримки поїзди, які в момент часу t слідують за графіком руху. Інфіковані це $I(t)$ – поїзди, що слідують із затримкою та впливають на слідування інших поїздів, передаючи їм затримку. Видужалі $R(t)$ – поїзди, що за час слідування через залізничну дільницю з затримкою, поглинули її (виконали нагін), слідують за графіком, або прибули на кінцеву станцію та не впливають на виникнення затримок в подальшому русі (рис. 2). Під поняттям нагін розуміється скорочення часу запізнення до встановлених нормативів діючого нормативного розкладу руху, або тривалості руху дільницею для вантажних поїздів.

Для підвищення точності моделювання важливо врахувати різний вплив поїздів різних типів на швидкість поширення затримки. Для прикладу, згідно нормативного документу [28], на залізничній мережі України, що відноситься до мереж без дотримання розкладу руху вантажних поїздів, найбільший вплив в залізничній мережі мають пасажирські поїзди дальнього сполучення та приміські. Причиною цього є їх пріоритетність та важливість дотримання нормативного розкладу руху поїздів. Після пасажирських поїздів нижчий пріоритет мають вантажні поїздопотоки, які слідують в мережі без дотримання розкладу, однак у випадку відхилення від запланованого диспетчерським персоналом плану руху мають значний вплив на поїзди вищої категорії. Для обліку впливу на силу поширення різних груп поїздопотоків в роботі запропоновано врахувати в класичній SIR-моделі гетерогенну епідемічну динаміку відповідно до [29]. За таких умов, в роботі передбачається, весь потік поїздів на дільниці розділити на три класи відповідно до їх типу r . Слід зазначити, що в межах одного класу можна розрізняти різні категорії поїздів, наприклад, за швидкістю руху, їх довжині, або масі, тощо. Однак в даному дослідженні зроблено припущення, що усі поїзди одного класу мають подібні характеристики процесів зараження – передачі затримки та одужання – відновлення руху. Міграція між класами не передбачається.

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

Згідно графа переходів, що характеризує стани дільниці, у графі G на рис. 1 швидкість зміни кількості сприятливих до затримки поїздів на дільниці ij можна визначити як

$$\frac{dS_{ij}^r(t)}{dt} = - \sum_l \beta_{\delta_{ij}}^{r,l} \cdot S_{ij}^r(t) \cdot I_{ij}^l(t), \quad (1)$$

де S_{ij}^r – кількість сприятливих поїздів в класі r на дільниці ij , поїздів; $\beta_{\delta_{ij}}^{r,l}$ – швидкість розповсюдження затримки від поїздопотоку r до поїздопотоку l на дільниці типу δ_{ij} , де $r=l$, $r,l \in R$; I_{ij}^l – кількість інфікованих поїздів класу l на дільниці ij , поїздів; t – час або крок моделювання, година.

Швидкість зміни кількості поїздів, що слідують через залізничну дільницю із затримкою, можна визначити як

$$\frac{dI_{ij}^r(t)}{dt} = \sum_l \beta_{\delta_{ij}}^{r,l} \cdot S_{ij}^r(t) \cdot I_{ij}^l(t) - \gamma_{\delta_{ij}}^r I_{ij}^r, \quad (2)$$

де I_{ij}^r – кількість затриманих поїздів в класі r на дільниці ij , поїздів; $\gamma_{\delta_{ij}}^r$ – швидкість відновлення руху поїздопотоків r на дільниці типу δ_{ij} .

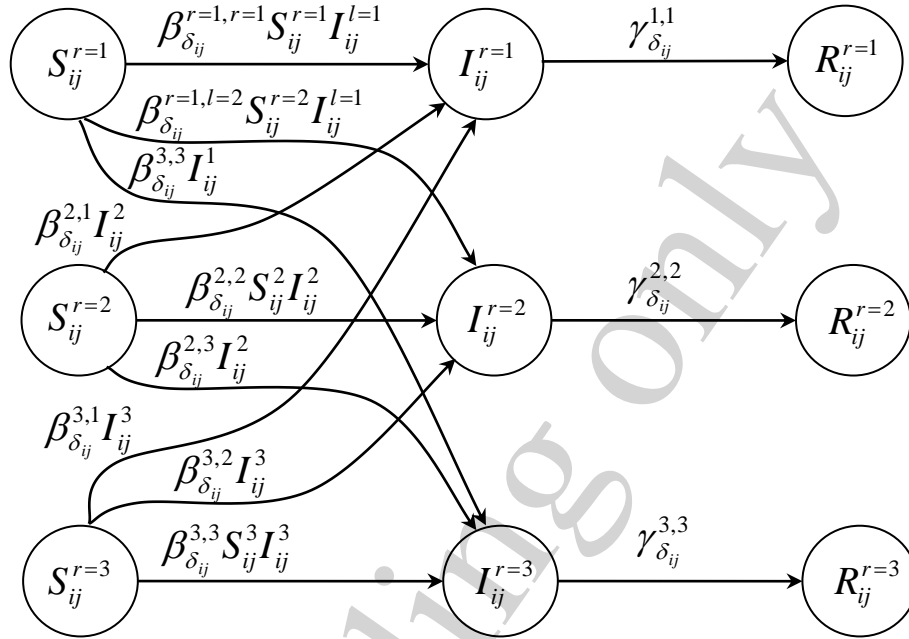


Рис. 2. Граф переходів між станами SIR-моделі, що має окремі групи пасажирських, приміських та вантажних поїздопотоків

Поїзди, що слідували з затримкою, та поглинули її, переходять до групи $R_{ij}^r(t)$ зі швидкістю тому швидкість відновлення руху можна визначити як

$$\frac{dR_{ij}^r(t)}{dt} = -\gamma_{\delta_{ij}}^r I_{ij}^r. \quad (3)$$

Всі параметри системи мають додатні значення. Система рівнянь (1)–(3) має умову нормування виду $N_{ij}^r = S_{ij}^r(t) + I_{ij}^r(t) + R_{ij}^r$, де N_{ij}^r – загальна кількість поїздів класу r на дільниці ij , $N = \sum_r N^r = N = \sum_r f_{ij}^{t\mu,r}$, N – загальна кількість поїздів всіх класів на дільниці. Початкові умови для системи (1)–(3) рівні $(S_{ij,0}^r, I_{ij,0}^r, 0)$, де $S_{ij,0}^r, I_{ij,0}^r$ – кількість сприятливих та затриманих поїздів в класі r на дільниці ij при $t=0$ відповідно.

В залежності від кількості колій на дільниці типу δ_{ij} запропоновано прив'язати $SIR_{\delta_{ij}}$ -модель з відповідними коефіцієнтами швидкості. Це дозволи-

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

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

$$I_{jk,transf}^r = \frac{I_{ij}^r \sum N_{ik}^r}{N_{ij}^r}, \quad (4)$$

де $I_{jk,transf}^r$ – кількість затриманих поїздів класу r , що є транзитними для вершини j та слідує на дільницю jk , $j=k$, поїздів; $\sum N_{ik}^r$ – загальний потік поїздів класу r , що прослідує вершину j в напрямі вершини k ; k – номер вершини, що передує вершині j на ребрі графу G , поїздів.

Для кожної дільниці з характеристиками інфраструктури типу δ_{ij} запропоновано настроїти відповідну $SIR_{\delta_{ij}}$ -модель з рівняннями (1)–(3) за допомогою розв’язку оптимізаційної задачі для пошуку коефіцієнтів швидкості $\beta_{\delta_{ij}}^{r,l}$ розповсюдження затримки. Для настроювання моделей запропоновано використати дані щодо розповсюдження середньої затримки в нормативному графіку руху. Коефіцієнти швидкості в межах розв’язку оптимізаційної задачі генетичним алгоритмом підбираються на основі мінімізації середньої абсолютної похибки (MAPE) між емпіричними та результатами виходу після розв’язку системи рівнянь (1)–(3). Розв’язок системи диференціальних рівнянь (1)–(3) в межах фітнес функції запропоновано виконувати методом Рунге-Кутта 4-го порядку.

Для послідовного розв’язку $SIR_{\delta_{ij}}$ -моделей, що відповідають кожному ребру графа, розроблено алгоритм [30], який перетворює граф мережі на спрямоване дерево, коренем якого є станція виникнення затримки. Згідно до вибудованої послідовності розв’язується $SIR_{\delta_{ij}}$ модель відповідної дільниці, що визначає параметри поширення затримки на графі.

5 Результати моделювання розповсюдження затримок поїздів на графі залізничного полігону

В межах експериментальних досліджень в роботі отримані результати поширення затримок на реальних дільницях одного із залізничних полігонів АТ “Укрзалізниця”. Для реалізації запропонованого методу моделювання розповсюдження затримок поїздів на графі був розроблений спеціальний програмний продукт в середовищі Matlab. Виконане настроювання двох $SIR_{\delta_{ij}}$ -моделей для восьми залізничних дільниць з яких дві $SIR_{\delta_{ij}=2}$ -моделі відповідають одноколійно-двоколійній інфраструктурі дільниці, а всі інші двоколійні – $SIR_{\delta_{ij}=3}$ -моделі.

Граф залізничного полігону із заданими потоками поїздів різних класів r представлено на рис. 3.

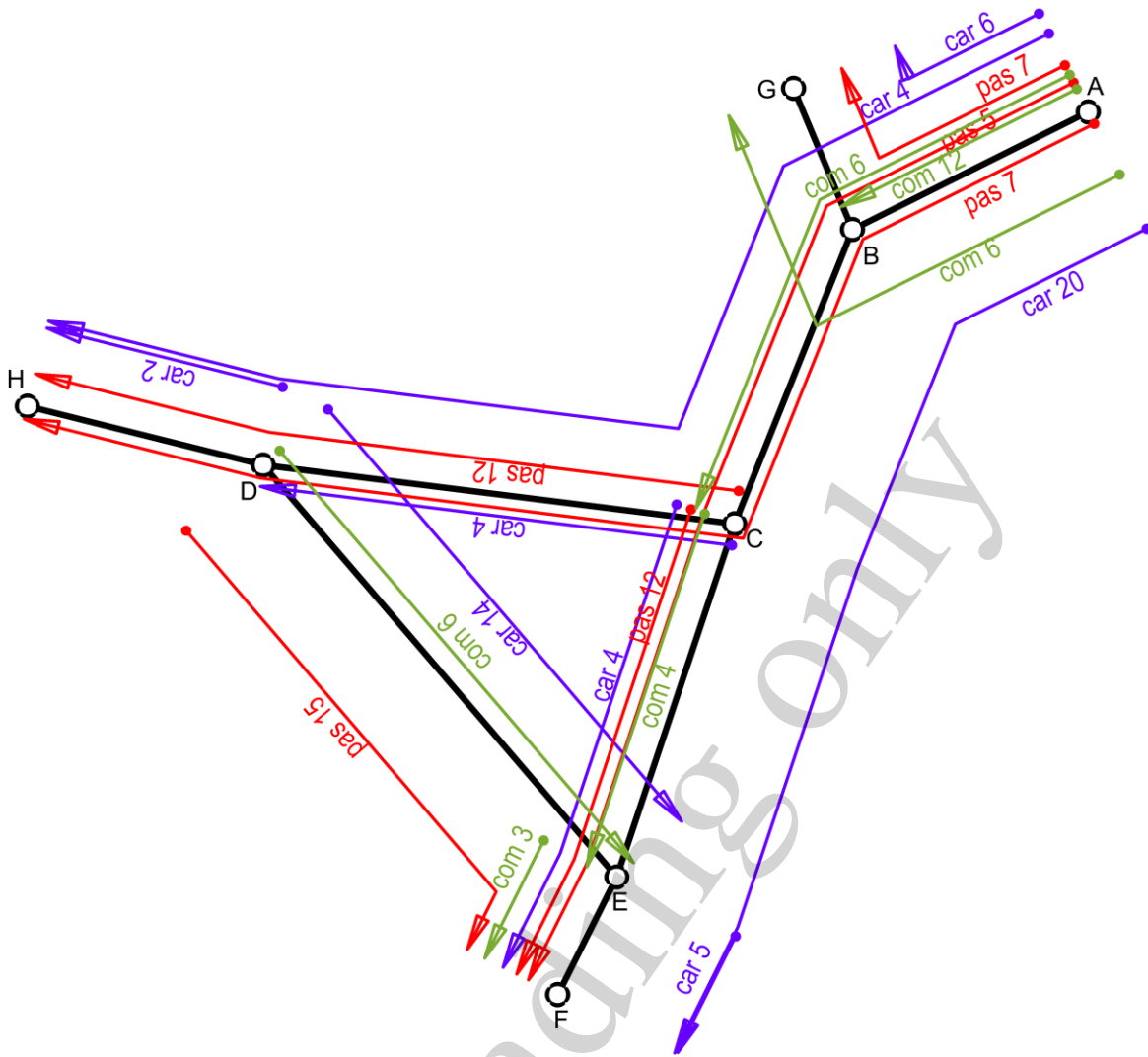


Рис. 3. Граф залізничного полігону з візуалізацією потоків поїздів різних класів

Початковою вершиною поширення модельної затримки на графі прийнята станція А. Для автоматичного визначення послідовності запуску систем $SIR_{\delta_{ij}}$ -моделей в напрямі поширення затримки використано алгоритм для перетворення графу полігону у спрямований граф дерево з вершиною корнем – станція А. На рис. 4 наведено перетворений граф полігону у спрямоване дерево.

В межах експерименту запропоновано дослідити спроможність відновлення руху за умови затримання чотирьох пасажирських і п'ятьох вантажних поїздів за відправлення із станції А. Початкові умови дільниці А-В ($S_{ij}^r(t=0)$, $I_{ij}^r(t=0)$, 0): $S^{r=1}(t=0)=15$ пасажирських поїздів; $S^{r=2}(t=0)=28$ приміських поїздів; $S^{r=3}(t=0)=25$ вантажних поїздів; $I^{r=1}(t=0)=4$ поїздів; $I^{r=2}(t=0)=0$ поїздів та $I^{r=3}(t=0)=5$ поїздів. Застосовані наступні коефіцієнти відновлення затримки у поїздів класу r на дільниці: $\gamma^{r=1}=3$ хв=0.05 год; $\gamma^{r=2}=4$ хв=0.0667 год; $\gamma^{r=3}=6$ хв=0.10 год. Коефіцієнти швидкості поширення затримки $\beta_{\delta_{ij}}^{r,l} \in \{3 \times 3\}$ приймалися відповідно до значень розв'язку оптимізаційної задачі настроювання відповідних $SIR_{\delta_{ij}}$ -моделей.

Початкові умови та значення станів поїздів різних класів r на дільницях залізничного полігону, що досліджується наведені у табл. 1.

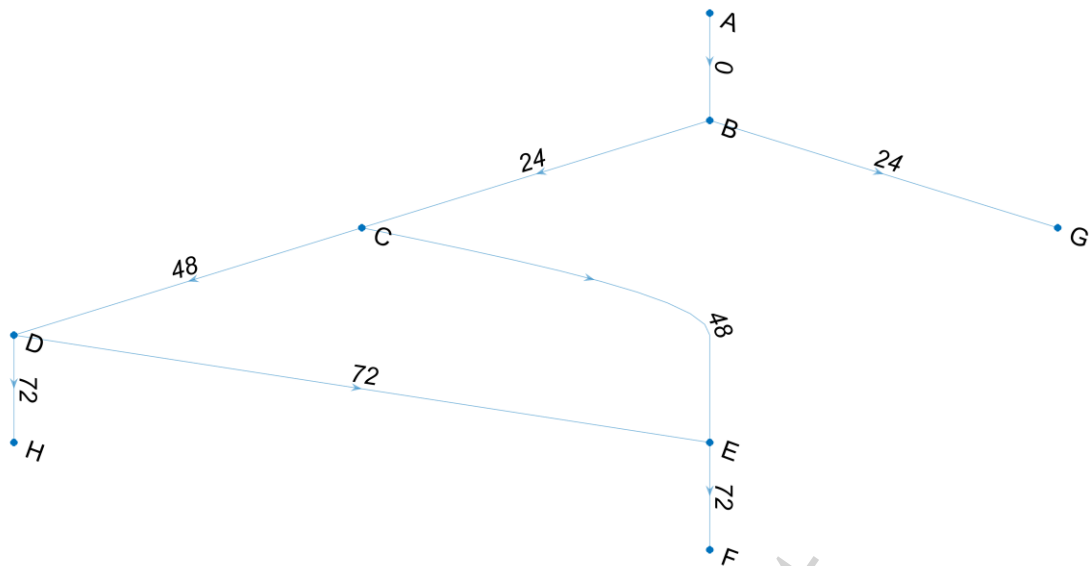


Рис. 4. Граф дерево з коренем у вершині А для послідовного розв'язку $SIR_{\delta ij}$ -моделей

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. 5.

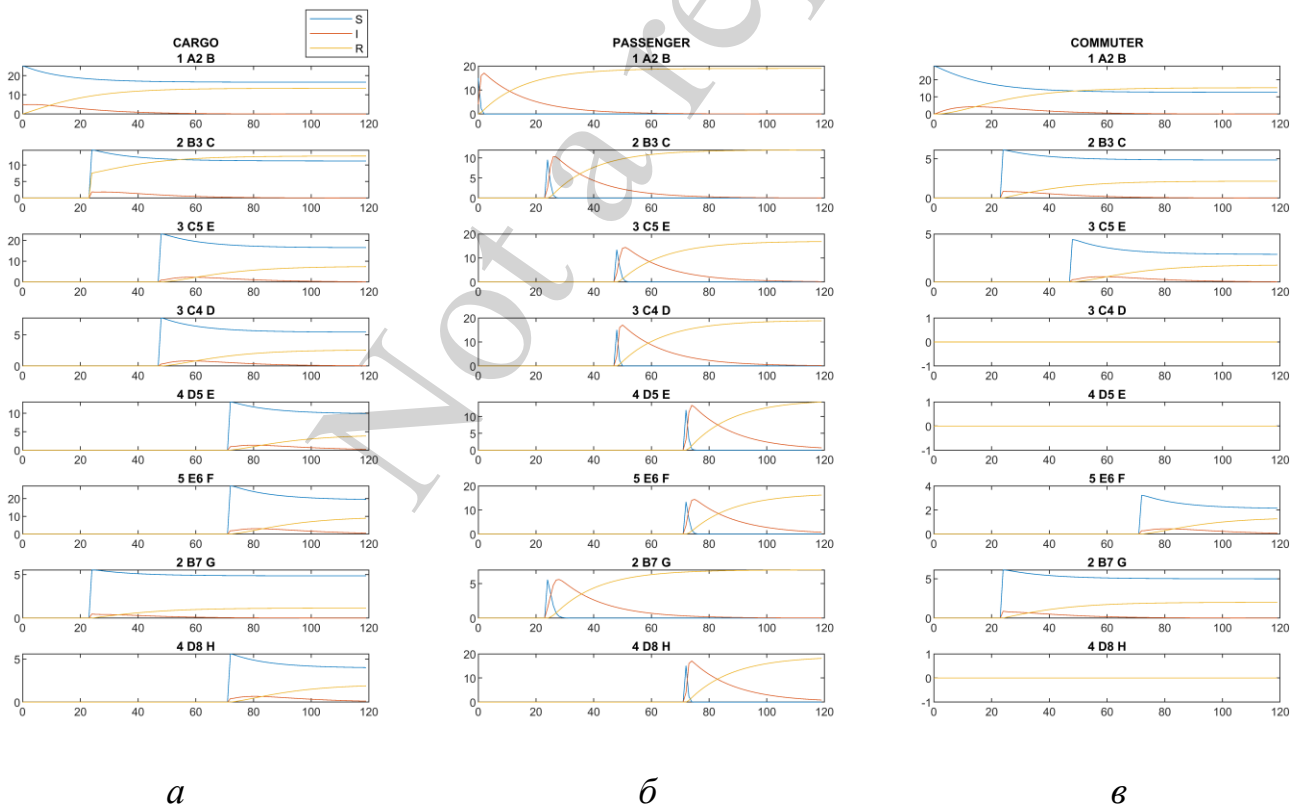


Рис. 5. Графіки динаміки зміни станів потоків поїздів в умовах відновлення руху поїздів на ділянках залізничного полігону при виникненні затримок за відправленням на станції А: *а* – пасажирські поїзди; *б* – приміські поїзди; *в* – вантажні поїзди

За результатами моделювання чисельно визначений вплив “мережевого ефекту” на надійність руху поїздопотоків на розгалуженому залізничному полігоні. З чотирьох затриманих пасажирських поїздів при закладеному компенсаційному часі відновлення 3 хвилини вдається послідовно на лінії А-В-С-Е-*F* відновити рух відповідно від двох до трьох пасажирських поїздів. Однак на виході полігону по станції *F* все ж затримка залишає у двох поїздів. Компенсаційний час резерву, що закладений на лінії А-В-С-Е-*F*, дозволяє із п’яти затриманих вантажних поїздів по станції А відновити рух до станції *F* – затримано лише один вантажний поїзд. Однак закладений час відновлення для поїздів на дільниці Е-*F* не дозволяє відновити рух з причини затримок поїздів переданих з попередньої дільниці D-Е. Це вимагає перегляду резервів часу у бік збільшення для дільниці Е-*F*, або суміжної з нею D-Е для можливості поглинання первинної затримки на залізничному полігоні.

Таблиця 2

Результати моделювання відновлення руху поїздів на дільницях залізничного полігону

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

Результати моделювання дозволили оцінити вплив затримки на стабільність руху поїздопотоків при відхиленні від основної лінії А-В-С-Е-Ф по станції С. На відхиленні лінії С-Д-Н первинна затримка призвела до виходу з полігону по станції Н одного затриманого пасажирського та чотирьох приміських поїздів. На дільниці А-В утворення первинної затримки було відновлено рух 58,4 % від затриманих пасажирських поїздів та 70,1 % від затриманих вантажних поїздів. Чого стало не достатньо для поглинання первинних затримок на полігоні. Найбільш згубний вплив доводиться на приміські поїзди, які майже не вдається відновити на всіх дільницях полігону в умовах затримок пасажирських поїздів, що мають вищий пріоритет. Отримані результати моделювання підтвердили адекватність розв'язків на основі порівняння реальних умов роботи дільниць при затримках поїздів з модельними. Закладені коефіцієнти відновлення затримки відповідають нормативним у графіку руху і є недостатніми для повноцінного відновлення руху. Це доводить, що діючі в нормативному графіку руху величини резерву часу необхідно переглянути у бік збільшення.

Однією із важливих переваг даного методу моделювання є його швидкість розрахунків в умовах автоматизації. Отримані результати було досягнуто за 52,411585 секунд розрахунку з параметрами обчислювальних потужностей Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU v 1,60GHz 1.80 GHz з ОЗУ 4 ГБ. Для порівняння у дослідженні [6], де застосовано оптимізаційну математичну модель, що будує детальний графік руху поїздів, розрахунок тільки для однієї дільниці триває до 7 хвилин. За ручним способом побудови графіків руху, що є найбільш точним методом, перевірка на затримку тільки на одній дільниці може потребувати декілька робочих днів.

6. Обговорення результатів дослідження щодо моделювання розповсюдження затримок поїздів на розгалуженому залізничному полігоні

Отримані результати моделювання розповсюдження затримок поїздів на розгалуженому залізничному полігоні свідчать про те, що запропонований метод моделювання на основі модифікованих епідеміологічних моделей є досить точним – похибка між емпіричними та модельними результатами складає до 10 %, в умовах швидких розрахунків. Крім того, на відміну від відомих підходів до моделювання планового руху поїздів [21, 22] та мікромоделювання [6], даний метод дозволяє прогнозувати поширення затримок з урахуванням закладених величин резервів часу на відновлення руху в залізничних системах без дотримання розкладу руху вантажних поїздів. Результати підтверджені експериментальними дослідженнями поширення затримок на реальних дільницях одного із залізничних полігонів АТ “Укрзалізниця” (табл. 2). Згідно проведеного аналізу літератури, в залізничній системі з рухом вантажних поїздів без дотримання розкладу руху досить складно передбачити вплив різних категорій поїздів в потоці. Запропонований підхід з формалізації гетерогенної динаміки поширення затримок від потоків поїздів різної пріоритетності дозволив підвищити точність моделювання. Це вдалося за рахунок побудованої системи диференціальних рівнянь (1)–(3), яка дозволяє за рахунок коефіцієнтів швидкості розповсюдження затримки враховувати вплив сили поширення затримки від різних

категорій поїздопотоків. На перших етапах дослідження реалізація моделювання з використанням класичних SIR-моделей без розділення потоків поїздів на три класи відповідно до їх категорії показували погані результати – середня абсолютна похибка між емпіричними та модельними результатами досягала 35 %.

Запропонований метод моделювання розповсюдження затримок поїздів на розгалужених залізничних полігонах потребує подальших перевірок на більших мережах. Однак, отримані результати швидкості розв'язку систем рівнянь SIR-моделей свідчать про достатність наявних обчислювальних потужностей для збільшення розмірності задачі. Без складання реального графіка руху поїздів на дільниці досить складно визначити вплив затримки поїзда однієї категорії на іншу. В даному дослідженні вдалося на макрорівні чисельно оцінити взаємовплив поїздів різної пріоритетності у графіку руху поїздів. Це стало можливо за допомогою запропонованої процедури настроювання коефіцієнтів швидкості розповсюдження затримки SIR-моделей. Одним із недоліків розробленого підходу є складність отримання реальних даних щодо розповсюдження затримок в залізничній мережі для можливості настроювання коефіцієнтів швидкості. Крім того, даний підхід має обмежений поріг підвищення точності у порівнянні з методами точної побудови графіків руху поїздів.

Перевагою застосування методу моделювання розповсюдження затримок поїздів є можливість використання на розгалужених залізничних полігонах з прийнятною швидкістю та точністю. Це дозволяє враховувати вплив “мережевого ефекту” [15]. Застосування даного підходу дозволить автоматизувати складний процес пошуку раціональних величин компенсаційного часу в нитках поїздів різних категорій на залізничній дільниці і, як наслідок, підвищити пунктуальність та надійність нормативних графіків руху поїздів.

7. Висновки

1. Формалізовано процес розповсюдження затримок поїздів на розгалужених залізничних полігонах за допомогою модифікованих епідеміологічних SIR-моделей. Це дозволило пришвидшити точність складних і тривалих розрахунків поширення затримок поїздів з урахуванням впливу “мережевого ефекту”. Для підвищення точності розроблено математичну модель на базі епідеміологічних моделей типу SIR, які враховують взаємовплив поїздів з різним пріоритетом в потоці. Для послідовного розв'язку SIR-моделей, що відповідають взаємопов'язаним дільницям мережі, запропоновано перетворювати граф мережі на спрямоване дерево, коренем якого є станція або декілька станцій виникнення затримки.

2. Проведені експериментальні дослідження поширення затримок поїздів на залізничному полігоні з врахуванням взаємовпливу різних категорій поїздів в потоці та закладених резервів часу на відновлення руху дозволили кількісно оцінити поширення затримки п'яти вантажних і чотирьох пасажирських поїздів. Доведено, що в умовах виникнення одночасної первинної затримки у пасажирських і вантажних поїздів на початку руху по станції А найбільш згубно впливає на приміські поїзди на всіх дільницях полігону, що досліджувався. Отримані кількісні результати дозволили виявити недоліки у встановленні ве-

личин резервів часу на дільниці E-F та суміжної з нею D-E – закладений резервний час для поїздів не дозволяє відновити рух. Результати моделювання підтвердили адекватність отриманих розв’язків. Запропонований метод моделювання розповсюдження затримок поїздів може використовуватись як інструмент для дослідження впливу закладених величин резервів часу у нормативних графіках руху поїздів для їх удосконалення.

Література

1. Kariyazaki, K., Hibino, N., Morichi, S. (2013). Simulation Analysis of Train Operation to Recover Knock-on Delay under High-Frequency. 13th World Conference on Transport Research. Rio de Janeiro. URL: <http://www.wctrs-society.com/wp-content/uploads/abstracts/rio/selected/1603.pdf>
2. Müller-Hannemann, M., Schnee, M. (2009). Efficient Timetable Information in the Presence of Delays. *Lecture Notes in Computer Science*, 249–272. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-05465-5_10
3. Goverde, R. M. P. (2010). A delay propagation algorithm for large-scale railway traffic networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18 (3), 269–287. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.01.002>
4. Masiuk, V., Myronenko, V., Horoshko, V., Prokhorchenko, A., Hrushevska, T., Shcherbyna, R. et. al. (2019). Improvement of efficiency in the organization of transfer trains at developed railway nodes by implementing a “flexible model.” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (3 (98)), 32–39. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.162143>
5. Butko, T., Prokhorchenko, A., Golovko, T., Prokhorchenko, G. (2018). Development of the method for modeling the propagation of delays in non-cyclic train scheduling on the railroads with mixed traffic. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (3 (91)), 30–39. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123141>
6. Meester, L. E., Muns, S. (2007). Stochastic delay propagation in railway networks and phase-type distributions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41 (2), 218–230. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2006.02.007>
7. Berger, A., Gebhardt, A., Müller-Hannemann, M., Ostrowski, M. (2011). Stochastic delay prediction in large train networks. 11th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems, 100–111. doi: <https://doi.org/10.4230/OASIS.ATMOS.2011.100>
8. Yuan, J., Hansen, I. A. (2007). Optimizing capacity utilization of stations by estimating knock-on train delays. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41 (2), 202–217. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2006.02.004>
9. Barta, J., Rizzoli, A. E., Salani, M., Gambardella, L. M. (2012). Statistical modelling of delays in a rail freight transportation network. *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)*. doi: <https://doi.org/10.1109/wsc.2012.6465188>
10. Rößler, D., Reisch, J., Kliewer, N. (2019). Modeling Delay Propagation and Transmission in Railway Networks. 14th International Conference on Wirtschaftsinformatik.

11. Wang, P., Zhang, Q. (2019). Train delay analysis and prediction based on big data fusion. *Transportation Safety and Environment*, 1 (1), 79–88. doi: <https://doi.org/10.1093/tse/tdy001>
12. Graffagnino, T. (2012). Ensuring timetable stability with train traffic data. *Computers in Railways XIII*. doi: <https://doi.org/10.2495/cr120361>
13. Gorman, M. F. (2009). Statistical estimation of railroad congestion delay. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45 (3), 446–456. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2008.08.004>
14. Wen, C., Huang, P., Li, Z., Lessan, J., Fu, L., Jiang, C., Xu, X. (2019). Train Dispatching Management With Data- Driven Approaches: A Comprehensive Review and Appraisal. *IEEE Access*, 7, 114547–114571. doi: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2935106>
15. Landex, A. (2012). Network effects in railways. *Computers in Railways XIII*. doi: <https://doi.org/10.2495/cr120331>
16. Pagani, A., Mosquera, G., Alturki, A., Johnson, S., Jarvis, S., Wilson, A. et. al. (2019). Resilience or robustness: identifying topological vulnerabilities in rail networks. *Royal Society Open Science*, 6 (2), 181301. doi: <https://doi.org/10.1098/rsos.181301>
17. Monechi, B., Gravino, P., Di Clemente, R., Servedio, V. D. P. (2018). Complex delay dynamics on railway networks from universal laws to realistic modelling. *EPJ Data Science*, 7 (1). doi: <https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-018-0160-x>
18. Baspinar, B., Koyuncu, E. (2016). A Data-Driven Air Transportation Delay Propagation Model Using Epidemic Process Models. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2016, 1–11. doi: <https://doi.org/10.1155/2016/4836260>
19. Dai, X., Hu, M., Tian, W., Xie, D., Hu, B. (2016). Application of Epidemiology Model on Complex Networks in Propagation Dynamics of Airspace Congestion. *PLOS ONE*, 11 (6), e0157945. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157945>
20. Manitz, J., Harbering, J., Schmidt, M., Kneib, T., Schobel, A. (2014). Network-based Source Detection: From Infectious Disease Spreading to Train Delay Propagation. *Proceedings of the 29th International Workshop on Statistical Modelling*, 201–205.
21. Frankhuizen, K., Li, Y., Liu, H. (2017). Cascading Behavior of delay in Dutch Train Transportation: Network patterns and a model. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Cascading-Behavior-of-delay-in-Dutch-Train-%3A-and-a-Frankhuizen-Li/3a31366023f6626c5df52e6157aebddee8c54398>
22. Zeng, Z., Li, T. (2018). Analyzing Congestion Propagation on Urban Rail Transit Oversaturated Conditions: A Framework Based on SIR Epidemic Model. *Urban Rail Transit*, 4 (3), 130–140. doi: <https://doi.org/10.1007/s40864-018-0084-6>
23. Інструкція зі складання графіка руху поїздів на залізницях України (затв. Укрзалізниця 05.04.2002). Транспорт України.
24. Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України (затв. Укрзалізниця 14.03.2001 р. № 143/Ц). Транспорт України.

25. Kermack, W. O., McKendrick, A. G. (1927). Contributions to the mathematical theory of epidemics-I. Proc. Roy. Soc. London Ser. A, 115, 700–721.
26. Rushton, S., Mautner, A. J. (1955). The deterministic model of a simple epidemic for more than one community. Biometrika, 42 (1-2), 126–136. doi: <https://doi.org/10.1093/biomet/42.1-2.126>
27. Ball, F. (1985). Deterministic and stochastic epidemics with several kinds of susceptibles. Advances in Applied Probability, 17 (1), 1–22. doi: <https://doi.org/10.2307/1427049>
28. Правила технічної експлуатації залізниць України (затв. наказом Міністерства транспорту України від 20.12.96 N 411, зареєстровані у Мін'юсті 25.02.97 за № 50/1854 (зі змінами та доповненнями). Транспорт України.
29. Watson, R. K. (1972). On an epidemic in a stratified population. Journal of Applied Probability, 9 (3), 659–666. doi: <https://doi.org/10.2307/3212334>
30. Valiente, G. (2002). Algorithms on Trees and Graphs. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04921-1>

Not a reprint