

Український державний університет залізничного транспорту
Міністерства освіти і науки України

Український державний університет залізничного транспорту
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГУРІН ДМИТРО ОЛЕГОВИЧ

УДК 656.222.5

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.22.01 – транспортні системи

27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Д.О. Гурін

Науковий керівник

ПРОХОРЧЕНКО Андрій Володимирович,
доктор технічних наук, доцент

Харків – 2021

АНОТАЦІЯ

Гурін Д.О. Удосконалення методу визначення резервів часу у нитках графіку на основі моделювання розповсюдження затримок поїздів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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 у нитках графіку з використанням моделювання розповсюдження затримок поїздів.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у вирішенні наукового завдання щодо удосконалення методу визначення резервів часу у нитках графіку для залізничних систем без дотримання розкладу відправлення вантажних поїздів 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.

Практичні результати роботи полягають у тому, що вирішено прикладне завдання автоматизації складного процесу визначення раціональних резервів компенсаційного часу в нитках графіку на основі моделювання поширення затримок поїздів. Завдяки застосуванню методу машинного навчання для здобуття 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 врахуванням впливу “мережевого ефекту” для формулювання обґрунтованих правил пріоритетності пропуску 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.

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

За темою дисертації опубліковано 11 наукових праць, з яких 4 статті, що опубліковані у фахових наукових виданнях, затверджених МОН України (три статті включені до міжнародних наукометричних баз, дві з них включені до бази Scopus) та 2 статті у науковому виданні іншої держави, що входить до ОЕСР (включене до бази Scopus), шість праць апробаційного характеру.

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

Перший розділ присвячено аналізу операційної моделі залізничного транспорту України при діючій системі закладення резервів часу у графіку руху поїздів.

Проведено дослідження умов функціонування залізничного транспорту загального користування України. Досліджено загальні тенденції розвитку вантажних перевезень на залізничному транспорті та структуру ринку. 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 та в поїздах при русі на залізниці України збільшилась відповідно на 45,2 % та 33 % від показників 2007 року. У 2018 - 2019 роках критично збільшилась величина кількості та тривалості затримок у світлофорів. Кількість затримок у 2019 році

збільшилась в 4,6 рази у порівнянні з 2015 роком. Виявлено, що затримки в мережі згубно впливають на строки доставки вантажів, зокрема у грудні 2019 року показник порушення термінів доставки вантажних відправок на мережі АТ “Укрзалізниця” склав 15792 порушень, тобто в середньому за добу порушувалась доставка у 43,3 відправки. Це свідчить про значні проблеми в системі планування руху поїздопотоків та відсутності достатнього рівня надійності ГРП.

Виконано порівняльний аналіз закладених величин резервів часу на відновлення у нитках графіку встановлений стандартом UIC 451-1 OR Міжнародного союзу залізниць та діючого методу закладення резервів часу з реальними даними часу резервів у нитках нормативного графіка руху поїздів довів заниження даних величин. Це засвідчує, 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, 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.

Проведено аналіз наукових досліджень, що присвячені вивченню завдань підвищення надійності графіків руху поїздів. Аналіз різних підходів до прогнозування розповсюдження затримок поїздів в залізничній мережі дозволив виокремити наступні: детермінований, стохастичний, статистичний. На основі аналізу теоретичних і практичних досліджень різних підходів щодо підвищення надійності графіку руху поїздів в залізничних системах світу, зроблено висновок, 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.

Другий розділ присвячено дослідженню технологічних особливостей завдання пошуку раціональних величин компенсаційного часу в нитках графіку поїздів різних категорій. Доведено, що найбільш невивченим є час для відновлення у нитці, що розподілений за способом компенсації під час руху (англ., *running time supplements*). Компенсація при русі полягає в 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.

Для вирішення задачі пошуку раціональних величин компенсаційного часу в нитках графіку поїздів різних категорій запропоновано застосувати модифіковану SIR-модель (“*Susceptible–Infected–Removed model*”). Адаптуючи дану модель до задачі впливу величини затримок поїздів на ГРП залізничної мережі, можна представити процес розповсюдження інфекційних хвороб як процес розповсюдження затримки поїздів та пов’язаного впливу на рух поїздів на залізничній мережі. В межах прийнятої постановки задачі загальну кількість ниток поїздів у ГРП слід розділяти умовно на групи: чутливі до затримки поїзди, які в момент часу слідують за графіком але потенційно можуть бути затримані при русі на дільниці (англ., *Susceptible*); поїзди, що слідують із затримкою та впливають на слідування інших поїздів, передаючи їм затримку (англ., *Infected*); поїзди, що за час слідування через залізничну дільницю з затримкою, поглинули її (виконали нагін), слідують за графіком, та не впливають на виникнення затримок в подальшому русі (англ., *Recovered*).

Розроблено модифіковану математичну епідеміологічну SIR-модель, яка дозволяє чисельно оцінити швидкість впливу поїздів різних категорій і величини їх резервів компенсації часу при русі на надійність нормативного графіку руху поїздів. Даний макрорівневий підхід до моделювання розповсюдження затримок поїздів передбачає застосування методу машинного навчання для здобуття знань з даних реальних затримок поїздів на дільниці при пошуку параметрів диференціальних рівнянь SIR-моделі. В межах методу

навчання застосовано метод еволюційних обчислень, зокрема генетичний алгоритм.

Третій розділ присвячено розробці методу моделювання розповсюдження затримок поїздів на розгалужених залізничних полігонах на основі розробленої у другому розділі SIR-моделі для пошуку раціональних резервів часу на відновлення руху поїздів різних категорій в залежності від кількості затриманих поїздів у графіку руху. Даний метод дозволяє врахувати поширення первинної затримки у просторі і часі за рахунок представлення топології 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 визначати 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. Розроблений метод моделювання розповсюдження затримок поїздів на розгалужених залізничних полігонах дозволяє пришвидшити точність складних і тривалих розрахунків поширення затримок поїздів з урахуванням впливу “мережевого ефекту”.

В межах експериментальних досліджень в дисертаційній роботі отримані результати поширення затримок на реальних дільницях одного із залізничних полігонів АТ “Укрзалізниця”. За результатами моделювання вперше чисельно визначений вплив “мережевого ефекту” на надійність руху поїздопотоків на розгалуженому залізничному полігоні. Результати моделювання підтвердили адекватність отриманих розв’язків, що перевірено за критерієм Фішера. Похибка між емпіричними та модельними результатами складає до 10 %, в умовах швидких розрахунків. Для визначення раціональних резервів часу у нитках графіка запропоновано виконувати вибір альтернативних стратегій закладених резервів спираючись на оцінку 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.

Четвертий розділ присвячено формуванню вимог до автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу у нитках графіку для підвищення швидкості та якості складання нормативного графіку руху поїздів на залізниці України. Проведено аналіз діючих програмних продуктів для складання графіків руху поїздів в АТ “Укрзалізниця” та виявлено їх недоліки. Запропоновано інтегрувати дані програми в межах єдиного інформаційного середовища з урахуванням удосконаленої процедури визначення резервів часу у нитках графіку на основі розробленого комплексу математичних моделей. Розроблені рекомендації застосування удосконаленого методу визначення резервів часу у нитках графіку на основі моделювання розповсюдження затримок поїздів при складанні ГРП в межах реалізації планування перевезень за розкладом руху маршрутних поїздів (РРМП) та 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 розробки ГРП для визначення величин резервів часу у нитках графіку нормативного ГРП до введення їх у дію.

З метою економічного обґрунтування від впровадження розробленої в даному дисертаційному дослідженні автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу у нитках графіку проведені 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 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.

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

ABSTRACT

D. Gurin Improving the method of determining time reserves in the schedule threads based on modeling the propagation of train delays. - Qualifying scientific work – manuscript copyright.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences (PhD in technical sciences) in specialty 05.22.01 – “Transport systems” (275 - Transport technologies). - Ukrainian State University of Railway Transport, Ministry of Education and Science 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 scientific novelty of the dissertation is to solve the scientific problem of improving the method of determining time reserves in the schedule for railway systems without following the schedule of freight trains based on modeling the propagation of train delays of different categories.

For the first time:

– to formalize the process of spreading train delays at the railway station, a modified mathematical epidemiological SIR-model was developed, which, unlike the existing ones, allows to numerically assess the impact of trains of different categories and the size of their time compensation reserves on the reliability of train schedules. This macro-level approach to modeling the propagation of train delays involves the use 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 propagation at different speeds;

– to find rational reserves of time to restore the movement of trains of different categories depending on the number of detained trains in the schedule developed a method based on modeling the distribution of train delays on branched railway tracks. This method, in contrast to the existing ones, allows to take into account the propagation of the primary delay in space and time by presenting the topology of the railway network in the form of an undirected graph with reference to the graph edge of the mathematical system of differential equations SIR-model. This speeds up the accuracy of complex and lengthy train delay calculations, taking into account the impact of the "network effect".

Improved:

– complex of functional tasks of ASK VP UZ-E system on the basis of formation of requirements to the automated subsystem of definition of rational reserves of time in schedule threads for increase of speed and quality of drawing up of the standard schedule of trains on the railway of Ukraine that acquires importance in the conditions (RRMP) and implementation of an experiment on access of private locomotives to public railway infrastructure.

The practical results of the work are that the applied problem of automation of the complex process of determining the rational reserves of compensation time in the threads of the schedule based on modeling the distribution of train delays is solved. Thanks to the application of the machine learning method to obtain knowledge from the data of real train delays at the section when searching for parameters (coefficients of delay propagation coefficients) of differential equations of SIR-model, it was possible to numerically evaluate the interaction of trains of different priorities. This allows further assessment of the impact of trains of different categories on the section or the network as a whole, taking into account the impact of the "network effect" to formulate reasonable rules for the priority of trains in open access to railway infrastructure. The proposed approach to formalize the heterogeneous dynamics of delays from train flows of different priorities has increased the accuracy of modeling the propagation of train delays - the error between empirical and model results is up to 10% in terms of fast calculations.

The results of the dissertation research are used in the educational process of the Ukrainian State University of Railway Transport (USURT) in the training of specialists in the organization of transportation by rail. The results of the study were used to improve the operational work of railway landfills of the structural unit "Regional Traffic Control Center" of the regional branch "Southern Railway" JSC "Ukrzaliznytsia", which is confirmed by the relevant acts of implementation, which are given in the dissertation.

On the topic of the dissertation published 11 scientific papers, of which 4 articles published in professional scientific journals approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine (three articles included in international scientometric databases, two of them included in the Scopus database) and 2 articles in a scientific publication of another country. is part of the OECD (included in the Scopus database), six works of approbation nature.

The introduction substantiates the relevance of the topic, formulates the purpose and objectives of the study, reflects the scientific novelty and practical value, provides a general description of the work.

The first section is devoted to the analysis of the operational model of railway transport of Ukraine under the current system of sealing time reserves in the train schedule.

A study of the conditions of functioning of public railway transport in Ukraine. The general tendencies of development of freight transportations on railway transport and market structure are investigated. With a stable trend of falling freight base increases the time the car is in motion, which is an important element of the average turnover of the freight car. In 2019, the duration of the car at intermediate stations and in trains when moving on the railways of Ukraine increased by 45.2% and 33%, respectively, from 2007. In 2018-2019, the number and duration of delays at traffic lights have critically increased. The number of delays in 2019 increased 4.6 times compared to 2015. It was found that delays in the network have a detrimental effect on the delivery time of goods, in particular in December 2019 the rate of violation of delivery times on the network of JSC "Ukrzaliznytsia" was 15,792 violations, ie an

average of 43.3 shipments per day. This indicates significant problems in the system of planning the flow of trains and the lack of a sufficient level of reliability of fracturing.

A comparative analysis of the set values of time reserves for restoration in the schedule established by the UIC 451-1 OR standard of the International Union of Railways and the current method of setting time reserves with real data of reserve time in the threads of the normative train schedule proved to underestimate these values. This shows that despite the key role played by reserve time in the development of reliable schedules, often in practice an expert approach is used, which does not allow to reasonably choose rational parameters of the amount of reserve time to restore train trains of different categories. Given the above, it is concluded that improving the method of determining time reserves in the schedule based on the automation of calculations of train delay propagation simulations will increase the reliability of train flows and, consequently, change the negative dynamics of railway operation.

The analysis of the scientific researches devoted to studying of problems of increase of reliability of schedules of train movement is carried out. The analysis of different approaches to forecasting the spread of train delays in the railway network allowed to distinguish the following: deterministic, stochastic, statistical. Based on the analysis of theoretical and practical studies of different approaches to improving the reliability of train schedules in railway systems of the world, it is concluded that for a railway system with partial compliance with train schedules more acceptable and effective is the use of macro-level approach to train delays.

The second section is devoted to the study of technological features of the problem of finding rational values of compensation time in the threads of the schedule of trains of different categories. It is proved that the most unexplored is the time for recovery in the thread, which is distributed according to the method of compensation during movement (English, running time supplements). Compensation for movement is to use the difference between the minimum travel time of the train on the section and that planned schedule and contains a component - the time of

regular supplement (reserve), which is added to the train travel time on each section according to established rules or expert approach.

To solve the problem of finding rational values of compensation time in the schedule threads of trains of different categories, it is proposed to use a modified SIR-model (“Susceptible – Infected – Removed model”). Adapting this model to the problem of the influence of train delays on the fracturing of the railway network, we can present the process of spreading infectious diseases as a process of spreading train delays and the associated impact on train movement on the railway network. Within the framework of the accepted problem statement, the total number of train strings in fracturing should be divided into groups: train-sensitive trains that follow the schedule at the time but can potentially be delayed when moving on the section (Susceptible); trains that are delayed and affect the trains of other trains, transmitting a delay (Infected); trains that have absorbed a delay during the journey through the railway section (performed the overtaking), follow the schedule, and do not affect the occurrence of delays in further movement (Recovered).

A modified mathematical epidemiological SIR-model has been developed, which allows to numerically estimate the speed of impact of trains of different categories and the magnitude of their reserves of time compensation during movement on the reliability of the normative train schedule. This macro-level approach to modeling the propagation of train delays involves the application of the machine learning method to obtain knowledge from the data of real train delays at the site when searching for parameters of differential equations of the SIR-model. Within the method of teaching, the method of evolutionary calculations, in particular, the genetic algorithm, was applied.

The third section is devoted to the development of a method for modeling the propagation of train delays on branched railway tracks on the basis of the SIR model developed in the second section to find rational time reserves for resumption of trains of different categories depending on the number of delayed trains in the schedule. 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 edge (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".

Within the framework of experimental researches in the dissertation work the results of propagation of delays on real sections of one of the railway ranges of JSC “Ukrzaliznytsia” are obtained. According to the simulation results, for the first time the influence of the “network effect” on the reliability of train flows at the branched railway test site was numerically determined. The simulation results confirmed the adequacy of the obtained solutions, which was verified by Fisher's test. The error between empirical and model results is up to 10%, in terms of fast calculations. To determine the rational time reserves in the schedule, it is proposed to select alternative strategies for the reserves based on the assessment of the reliability of fracturing by calculating the readiness factor for each section of the landfill. Choosing the most acceptable mortgage strategy. The choice of the most acceptable strategy of establishing reserves is realized in the form of a statistical game according to several selection criteria.

The fourth section is devoted to the formation of requirements for the automated subsystem for determining rational time reserves in the schedule to improve the speed and quality of the regulatory schedule of trains on the railways of Ukraine. An analysis of existing software products for scheduling trains in JSC "Ukrzaliznytsia" and identified their shortcomings. It is offered to integrate the data of the program within the uniform information environment taking into account the

improved procedure of definition of time reserves in threads of the schedule on the basis of the developed complex of mathematical models. Recommendations for the application of an improved method for determining time reserves in the threads of the schedule based on modeling the distribution of train delays in the formation of fracturing within the implementation of scheduled scheduling (RRMP) and the introduction of an experiment on private locomotive access to public railway infrastructure. It is proposed to improve the set of functional tasks of ASK VP UZ-E system on the basis of integration of information flows with the developed decision support system (DSS) on the workstation of engineer-technologist for fracturing to determine the values of time reserves in the schedule of normative fracturing before their implementation.

For the purpose of economic substantiation from introduction of the automated subsystem of definition of rational reserves of time developed in the given dissertation research in threads of the schedule calculations are carried out. It is expected that the total amount of economic effect with a cumulative total for five years in terms of increasing the reliability of the train schedule and reducing the impact of delays on the duration of trains in trains based on the establishment of rational time reserves on Ukrainian railways will be about 566 million UAH. freight car turnover will decrease by 3.23% compared to current technology.

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

Список публікацій здобувача

Основні наукові праці:

Публікації у 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. № 169.С. 205-213. (видання індексується у базі *Index Copernicus, OUCI, DOIJ*).

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 у 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 у 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-я 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 одноколіній залізничній дільниці. *Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність на транспорті»*. Секції 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, Х.: Технологічний Центр, 2020. С.56. e-ISBN 978-617-7319-29-9

ЗМІСТ

ВСТУП	22
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ОПЕРАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ ПРИ ДІЮЧІЙ СИСТЕМІ ЗАКЛАДЕННЯ РЕЗЕРВІВ ЧАСУ У ГРАФІКУ РУХУ ПОЇЗДІВ	30
1.1. Дослідження умов функціонування залізничного транспорту загального користування України	30
1.2. Аналіз надійності перевізного процесу в залізничній системі України	42
1.3. Порівняльний аналіз підходів до встановлення резервів часу у графіку руху поїздів згідно стандарту Міжнародного союзу залізниць UIC 451-1 OR та нормативного методу АТ “Укрзалізниця”	48
1.4. Аналіз теоретичних і практичних досліджень щодо підвищення надійності графіка руху поїздів за рахунок вибору резервів часу в залізничних системах світу	57
1.5. Висновки до розділу 1	64
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАТРИМОК ПОЇЗДІВ НА ЗАЛІЗНИЧНІЙ ДІЛЬНИЦІ	68
2.1. Технологічні особливості завдання пошуку раціональних величин компенсаційного часу в нитках графіку поїздів різних категорій	68
2.2. Розробка математичної моделі для моделювання процесу розповсюдження затримок поїздів на залізничній дільниці	70
2.3. Розробка методу пошуку коефіцієнтів швидкості розповсюдження затримки математичної моделі колоній	73
2.4. Розв’язок розробленої системи рівнянь SIR-моделі для моделювання процесу розповсюдження затримок поїздів на залізничній дільниці	78
2.5. Перевірка розробленої математичної моделі розповсюдження затримок поїздів на залізничній дільниці на адекватність	82
2.6. Висновки до розділу 2	93
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МЕТОДУ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ	

ЗАТРИМОК ПОЇЗДІВ В ЗАЛІЗНИЧНИХ МЕРЕЖАХ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕПІДІОЛОГІЧНИХ SIR-МОДЕЛЕЙ	95
3.1. Просторове представлення проблеми розповсюдження затримок поїздів в залізничній системі	95
3.2. Результати моделювання розповсюдження затримок поїздів на графі залізничного полігону	102
3.3. Визначення раціональних резервів часу у нитках графіка на основі статистичної гри	107
3.4. Висновки до розділу 3	114
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ВИМОГ ДО ФОРМУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПІДСИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЗЕРВІВ ЧАСУ В НИТКАХ ГРАФІКА ТА ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	116
4.1. Дослідження функцій діючих автоматизованих систем АТ “Укрзалізниця” для розробки вимог до формування автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу в графіку руху поїздів	116
4.2. Дослідження процедур планування та розробки ниток графіку при наданні послуг з розкладом руху маршрутних поїздів та приватних локомотивів	120
4.3. Формування функцій та вимог до автоматизованої підсистеми визначення величин резервів часу в нитках графіку	123
4.4. Економічне обґрунтування від встановлення раціональної межі завантаження залізничного напрямку на основі автоматизації побудови графіка руху поїздів	128
4.5. Висновки до розділу 4	143
ВИСНОВКИ	145
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	148
Додаток А Порівняльний аналіз величин закладеного резерву часу у нормативному графіку руху поїздів з розрахунковими нормативами АТ Укрзалізниця та стандарту UIC 451-1 OR	165
Додаток Б Програмна реалізація математичної моделі SIR з машинним	

	21
навчанням	170
Додаток В Програмна реалізація математичної моделі розповсюдження затримок на графі залізничної мережі	175
Додаток Г Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	183
Додаток Д Акти впровадження	187

ВСТУП

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

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

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 Національної 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 ділянці 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 додатку Д даної 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 роботі [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.

РОЗДІЛ 1

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

1.1. Дослідження умов функціонування залізничного транспорту загального користування України

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

При дослідженні умов функціонування залізничної системи України важливо враховувати значні зміни у 2014 році, коли відбулась військова агресія Російської Федерації, окупація Кримського півострову та активні військові дії на території Донецької і Луганської областей України, що продовжуються станом на 2020 рік. Після даних подій послідувала транспортна блокада держави Україна, втрата частини залізничної мережі та значної частки обсягів перевезень, зміна просторового направлення вагонопотоків. Однак, з 2015 року позитивна динаміка розвитку економічних відносин з ЄС та іншими країнами світу, дозволила Україні перебудувати власну схему направлення вагонопотоків та адаптуватись до існуючих умов. Отже, репрезентативним періодом, який характеризує однакові умови функціонування залізничної

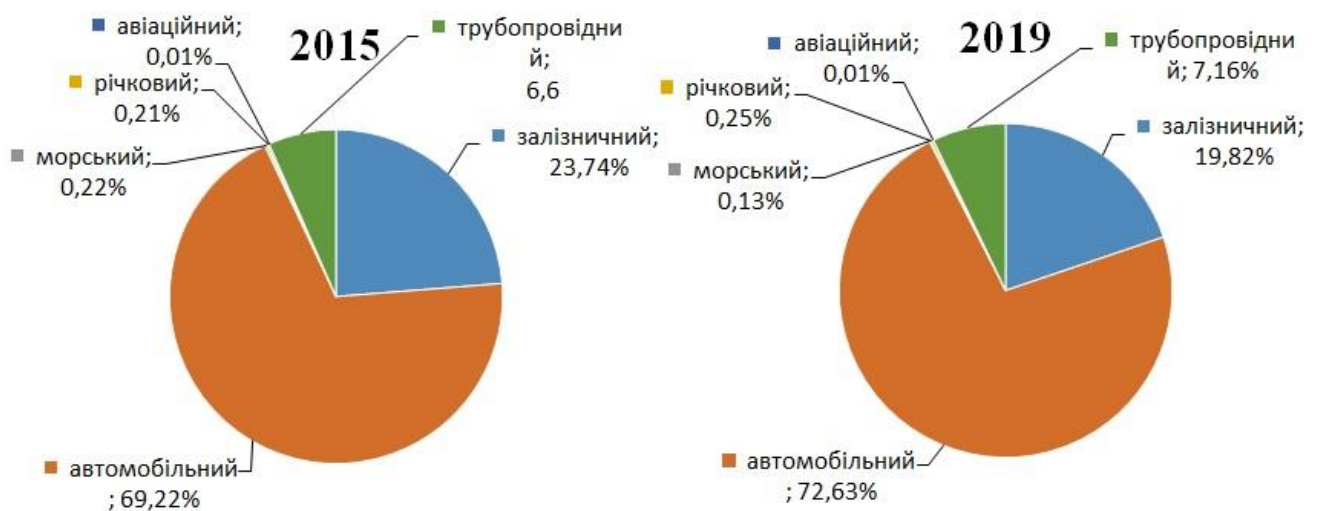
системи у порівнянні з 2019 роком є 2015-2018 роки. В даному періоді реалізовується структурна реформа залізничної галузі, а основним прибутковим видом діяльності АТ “Укрзалізниця” є вантажні перевезення. Із загальних 82,4 млрд. грн. доходів за 2019 рік від вантажних перевезень надійшло 72,5 млрд. грн. [21]. Пасажирські перевезення були й залишаються збитковими. За 2019 рік збитки склали близько 12,8 млрд грн, в т.ч. у приміському сполученні – 6,55 млрд грн [21].

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



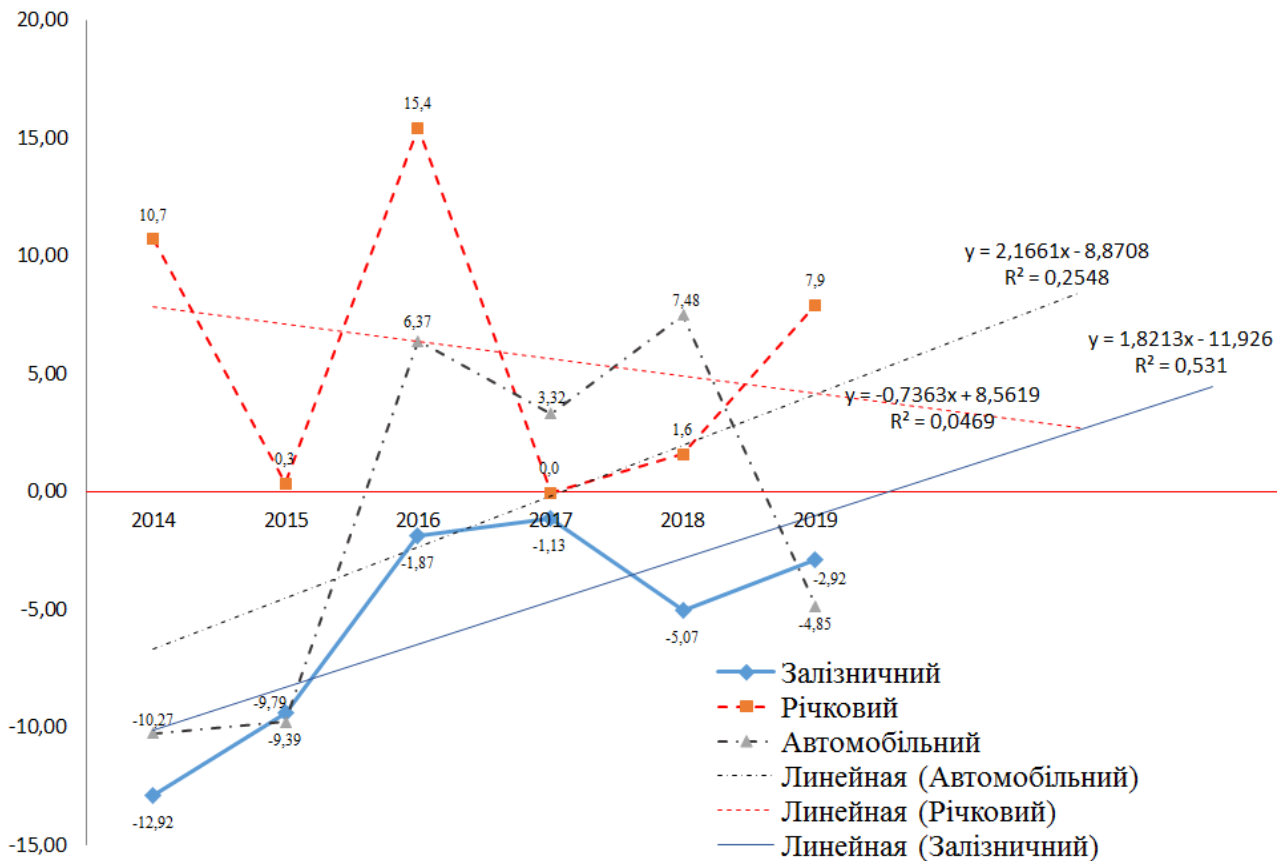
Риунок 1.1 – Динаміка кількісних показників на ринку перевезень вантажів за всіма видами транспорту України у період 2000-2019 рр: *а* – перевезено вантажів (млн.т); *б* –вантажобіг (млрд..т-км)

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



Риунок 1.2 – Питома вага окремих видів транспорту в перевезенні вантажів у 2015 та 2019 роках (%)

Динаміка зміни у відсотках до попереднього року показника обсягів перевезених вантажів на залізничному, автомобільному та річковому транспортах за період 2014-2019 рр наведено на рисунку 1.3. З 2014 року спостерігається тренд скорочення темпу падіння обсягів перевезень, але ситуація залишається критичною – за загальною тенденцією даний показник має від’ємні значення (рис. 1.3). В той же період динаміка зміни у відсотках до попереднього року показника обсягів перевезених вантажів на річковому транспорті є позитивною. Обсяги перевезень автомобільного транспорту також показали ві’демні значення у 2019 році - -4,8% від 2018 року, тоді як в період 2014-2018 років обсяги зростали.



Риунок 1.3 – Динаміка зміни у відсотках до попереднього року показника обсягів перевезених вантажів на залізничному, автомобільному та річковому транспортах за період 2014-2019 рр (попередній рік 100%)

Наведені на рисунку 1.3 лінії трендів, що отримані методом найменших квадратів за лінійною інтерполяцією динаміки зміни у відсотках до попереднього року показника обсягів перевезених вантажів на залізничному, автомобільному та річковому транспортах підтверджує основні тенденції. Залізничний транспорт зменшує темп падіння у відсотках до попереднього року, але лінія тренда показує позитивну динаміку темпів зростання автомобільного транспорту. Однак, якщо врахувати зміни операційної моделі залізничної системи у 2019 році та припустити, що прискорення перевезень та точність дотавки підвищаться, автомобільний транспорт може продовжити падіння, що спостерігалось у 2019 році, в наступних роках.

Одним із важливих показників конкурентоспроможності виду транспорту є показник середньої відстані перевезення однієї тонни вантажу. На рисунку 1.5 представлено діаграму середньої відстані перевезення однієї тонни вантажів окремими видами транспорту у 2019 році. В одній ніші знаходяться залізничний та річковий транспорт – відповідно 581 км та 406 км, що загострює конкуренцію особливо за умови більш дешевої вартості перевезення у річкового транспорту. Однак, головним недоліком річкового транспорту є значно більші витрати часу на перевезення ніж у залізничного та залежність від погодних умов, що збільшує непередбачуваність перевезення вантажу. Крім того, річковий транспорт має сезонні обмеження – судноплавство обмежується в зимовий період.

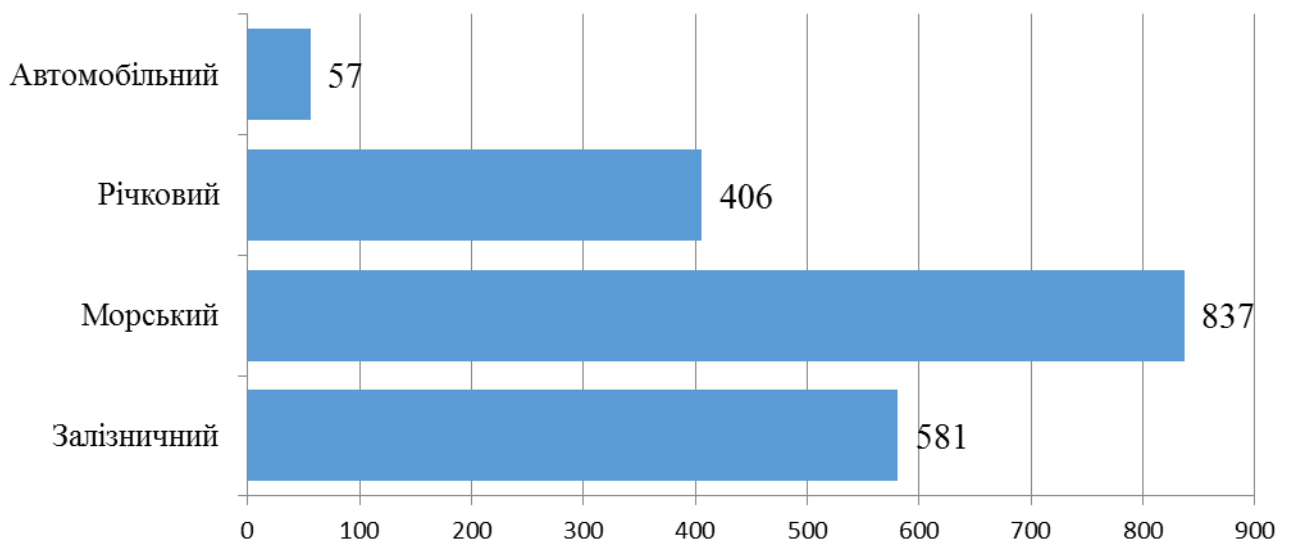
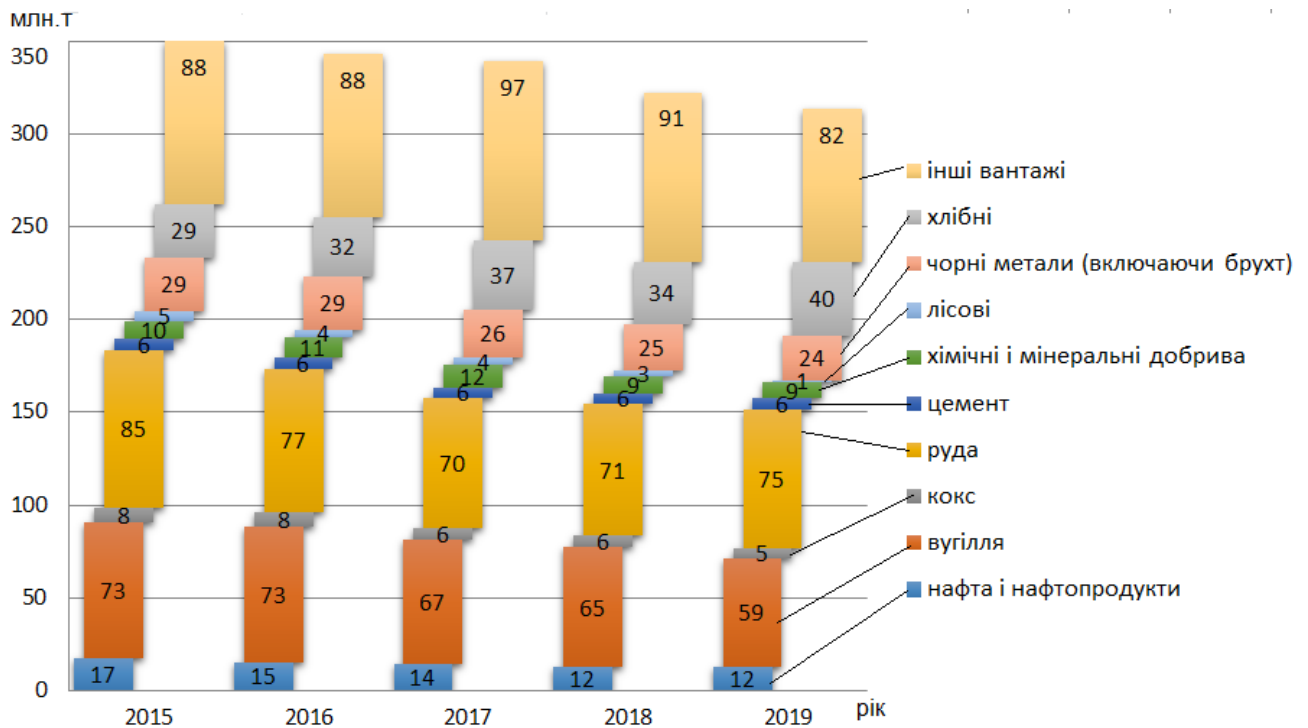


Рисунок 1.5 – Середня відстань перевезення однієї тонни вантажів окремими видами транспорту у 2019 році (км)

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



Риунок 1.4 – Перевезення вантажів залізничним транспортом загального користування з розподілом за видами вантажу у період 2015-2019 рр (%)

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

Автомобільний транспорт є дорожчим, але має конкурентні переваги за вартістю на відстані до 300 км та вищу швидкість перевезень, а в умовах дефіциту рухомого складу в залізничній системі може конкурувати на маршрутах й на відстанях близько 500 км. Для забезпечення стабільності

розвитку залізничного транспорту на ринку перевезень стає важливо підвищити точність руху поїздопотоків для отримання кращого рівня передбачуваності руху в системі.

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

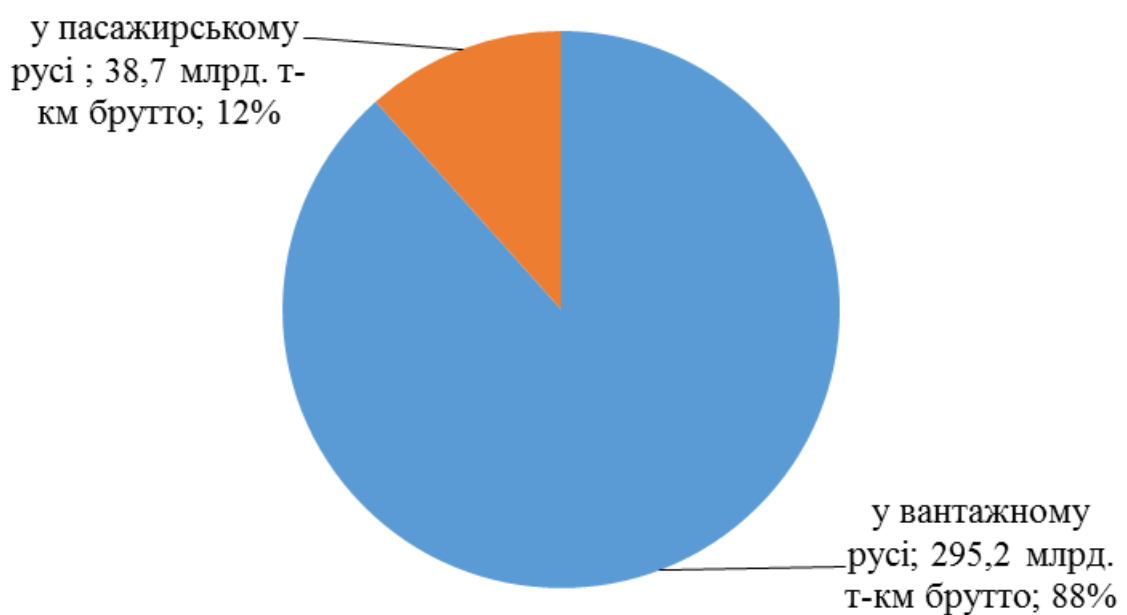


Рисунок 1.5 – Розподіл часток загального експлуатаційного вантажообігу бруто між пасажирським та вантажним рухом у 2018 році (млрд. т-км бруто)

Із загального аналізу кількісних та якісних показників залізничних вантажних перевезень від 2007 та періоду 2011–2018 років, що передують 2019 року, простежується стабільний тренд зниження кількісних показників в залізничній системі України (рис. 1.6), зокрема – робота вагонного парку в середньому на добу (сума навантаження й приймання навантажених вагонів), зі змінним коливаннями за загальним трендом зростання обороту вагона та простою на технічних станціях. У 2019 робота вагонного парку знизилась

порівняно з 2015 роком на 11,2 % або на 1667 вагонів, а з 2018 – на 3,7% або на 510 вагонів.

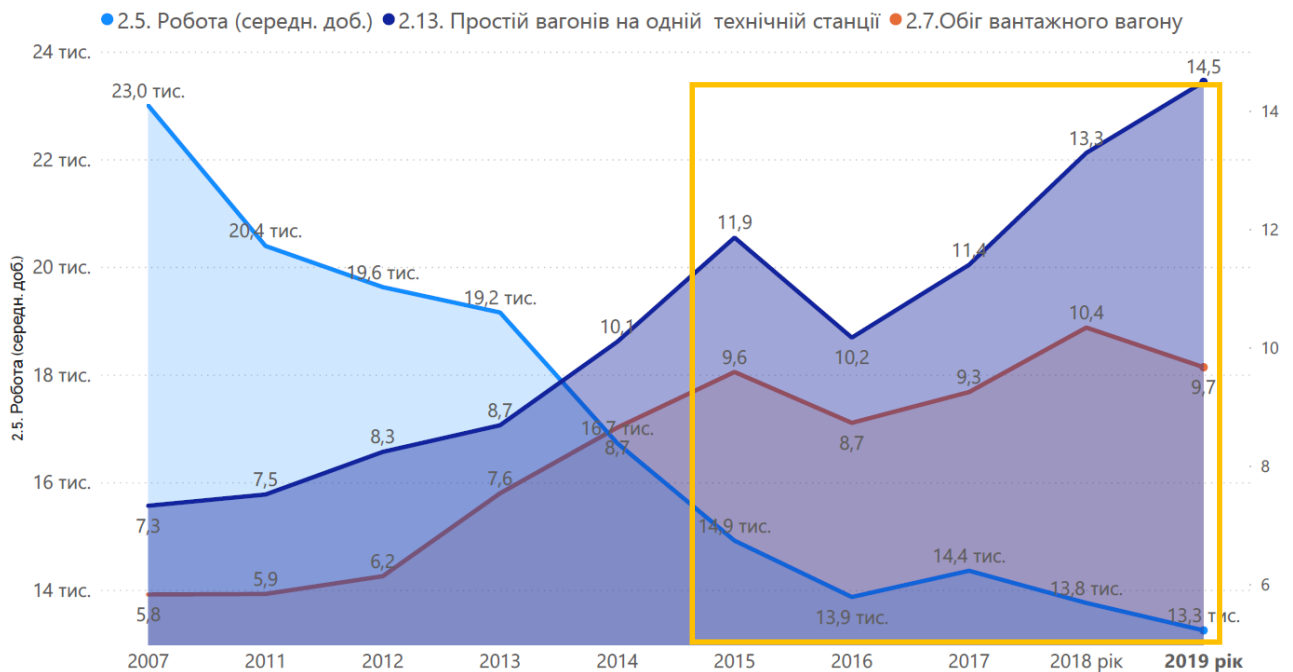


Рисунок 1.6 – Динаміка зміни роботи, обігу вагона та простою вагонів на одній технічній станції за період 2007,2011-2019 рр

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

Складові елементи обороту вагона за 2007 та період 2011-2019 роки наведені на рисунку 1.7.

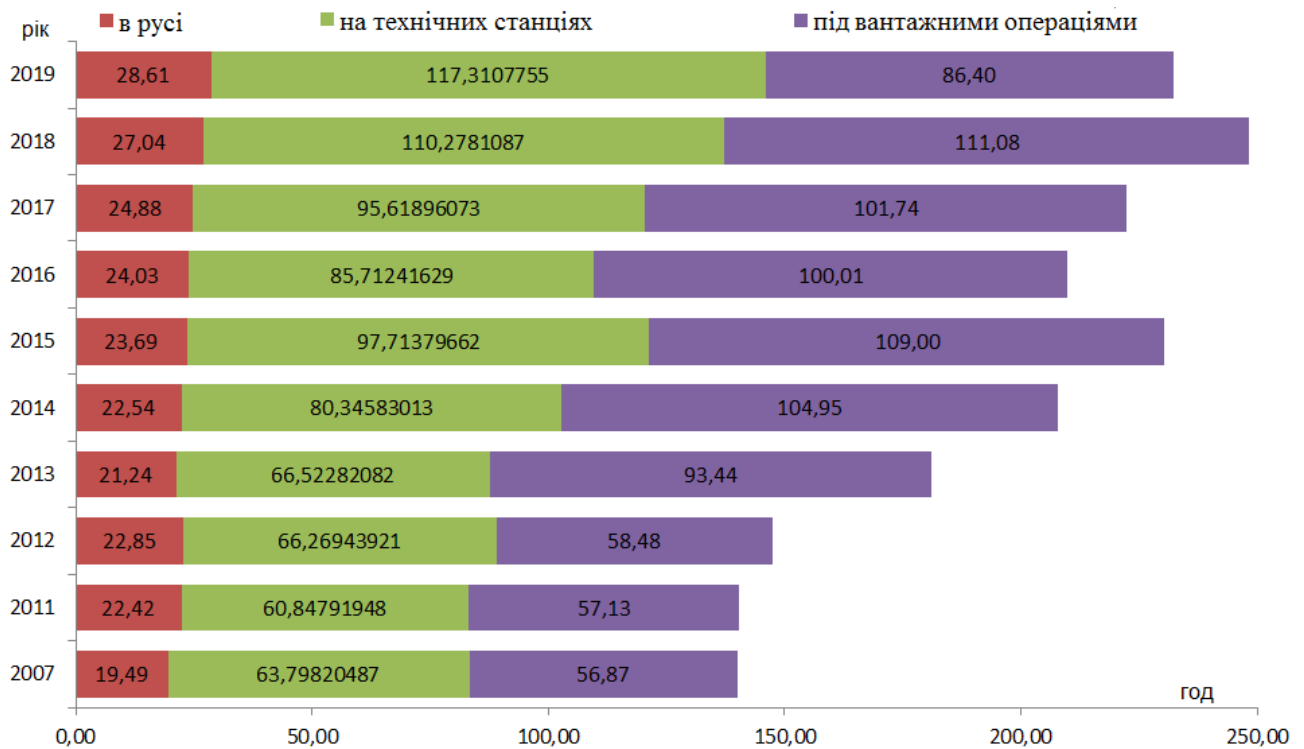


Рисунок 1.7 – Складові елементи обороту вагона за 2007 та період 2011-2019 рр

Важливий елемент обороту вагона є час знаходження вагона в русі, який зростає за весь досліджувальний період з причин погіршення технічного стану інфраструктури, тягового рухомого складу та відсутності закладеного рівня надійності ГРП. У 2019 році даний елемент збільшився на 1,57 год у порівнянні до 2018 року (рис. 1.8). Якщо деталізовано розкласти елемент знаходження вагона в русі на знаходження на перегонах в поїздах при русі і в поїздах на проміжних станціях, то збільшення тривалості знаходження на проміжних станціях склало 0,31 години від 2018 року, тоді як у поїздах при русі збільшення склало 1,26 години. Тривалість знаходження вагона на проміжних станціях та в поїздах при русі на залізниці України збільшилась відповідно на 45,2 % та 33 % від показників 2007 року. Однією з причин такого стану є відсутність якісної системи планування руху поїздопотоків, яка не враховує взаємозалежність руху поїздів, що призводить до виникнення великої кількості затримок при русі поїздів.

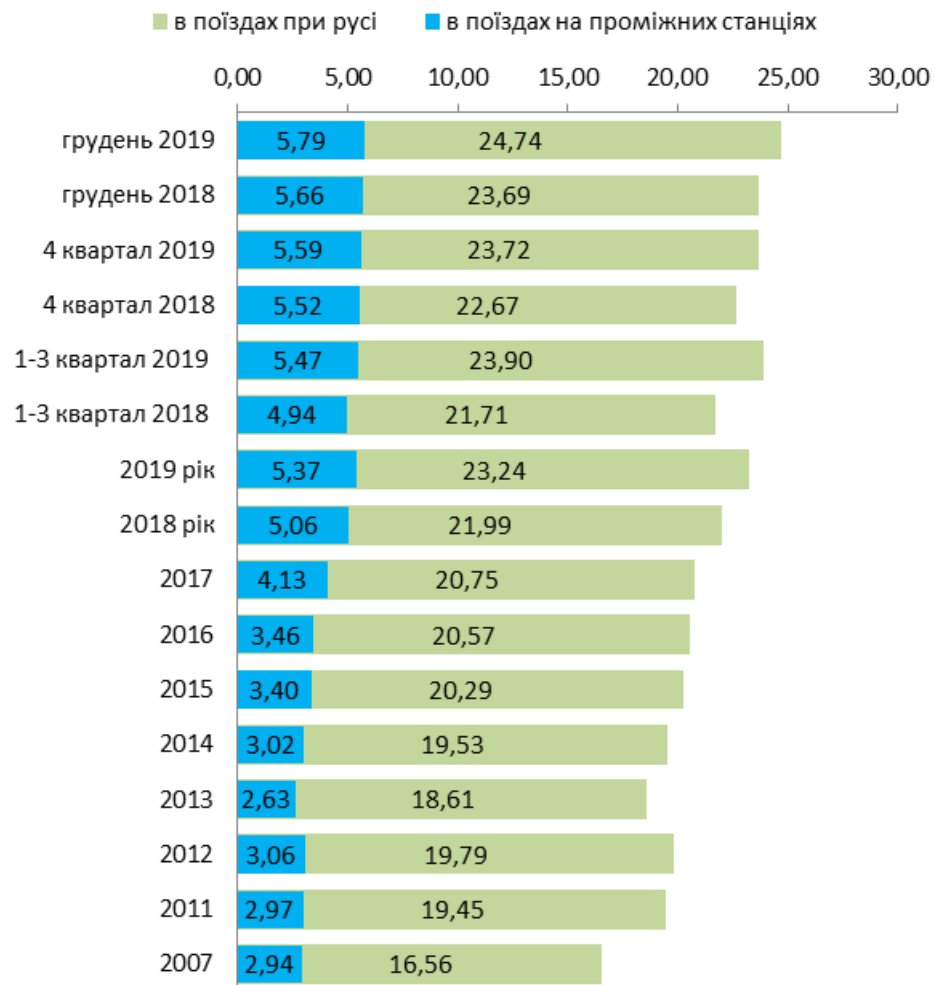


Рисунок 1.8 – Діаграма розподілу тривалості знаходження вагона на проміжних станціях та в поїздах при русі на залізниці України за період 2007-2019 рр

Збільшення тривалості знаходження вагонів в русі та падіння кількісних показників на фоні скорочення прибутків свідчить про значні проблеми залізничного транспорту та втрату конкурентоспроможності. На ринку перевезень для вантажовідправника важливим стає фактор точності часу переміщення. Саме тому, впровадження технологій перевезень на основі структурованості залізничних операцій [26] - підвищення точності руху поїздопотоків, дозволить підвищити рівень передбачуваності руху, і як наслідок змінити негативну динаміку якості операційної роботи залізниці.

Система організації перевезень вантажів передбачає прив'язку плану формування поїздів до нормативного графіка руху поїздів. Однак, враховуючи необхідність накопичення на сортувальних станціях нормативно заданої кількості вагонів у поїзді та його маси (в середньому поїзд складається з 45-55 вагонів з масою 4500-5000 тонн), застосовується принцип відправлення поїздів “за готовністю”, тобто якщо проведені всі операції з поїздом, то поїзд відправляють без дотримання розкладу руху. Це спричиняє не дотримання графіка руху поїздів, а тому на мережі АТ “Укрзалізниця” за розкладом слідує лише пасажирські поїзди.

Аналіз змін операційних моделей залізниць світу доводить, що залізнична галузь перестає бути монопольним середовищем, зростає потреба в персоналізованій мобільності та логістичних рішеннях, що забезпечують менші ризики в перевізному процесі [27]. В досить різних залізничних системах Північної Америки, Європи, Австралії і не тільки спостерігається єдиний тренд зміни операційної моделі, що ґрунтується на підвищенні точності та надійності руху поїздопотоків. Крім того, в межах запланованого [15-19] вертикального розділення АТ “Укрзалізниця” виникає необхідність кращої координації та дотримання наданого компаніям-перевізникам графіка руху поїздів. Такий підхід вимагає планування операцій в часі і просторі з можливістю закладення резервів часу для їх реалістичного виконання на кожен день.

В таких умовах все більшої важливості в практиці експлуатації залізничних систем набуває нормативний документ – графік руху поїздів (ГРП) [28], який є планом розподілу часу слідування потрібної кількості поїздів різних категорій через залізничну мережу. ГРП для кожного поїзда визначає план послідовного розподілу часу проходження за дільницями маршруту – нитка графіка руху поїздів (далі – нитка) – частка пропускної спроможності інфраструктури, необхідна для забезпечення руху за маршрутом одного поїзда між пунктами відправлення і призначення протягом визначеного проміжку часу [20].

В умовах впровадження цифровізації, автоматизації та ІоТ [29-31] з'являються нові можливості для використання графіку руху поїздів як

зв'язуючого елементу плану перевезень від заявки до запланованого навантаження, руху поїзда, ув'язки його прибуття з планом формування поїздів на опорних станціях мережі. Нитка графіка руху в умовах автоматизації перетворилась в цифрову модель для бронювання місць в складі поїзда із закладеним часом переформувань на станціях і прибуттям вантажної відправки на станцію вивантаження. Графік руху стає інтегрованим в межах спеціально створених цифрових платформ складання ГРП з ув'язкою з автоматизованих систем добового планування сортувальних станцій та диспетчеризації. Такий підхід відрізняється від старих концепцій експлуатації залізничних систем започаткованих у 60-х роках минулого сторіччя, де відсутня точність, відправлення поїздів відбувається "за готовністю", план формування поїздів і графік руху не враховують особливостей щоденних операцій, а оперативне планування засноване лише на макроконтролі перевізного процесу за встановленими точками (стиками) на залізничній мережі на звітну годину доби.

В нових умовах графік руху поїздів є сітьовим технологічним документом, що визначає основні нормативи технологічного процесу перевезень, який не просто відсторонено відображає нераціональну і суб'єктивну схему направлення поїздопотоків, а пристосовує попит і пропозицію. Це дозволяє підвищити надійність перевезень в залізничних системах, підвищити провізну та пропускну спроможність мережі, зменшити експлуатаційні витрати без додаткових капітальних вкладень в інфраструктуру та рухомий склад.

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

1.2. Аналіз надійності перевізного процесу в залізничній системі України

Одним із показників, що характеризує властивість безвідмовності перевізного процесу в залізничній системі є кількість та тривалість затримок поїздів. На рисунку 1.9 наведено паралельну динаміку кількості та тривалості

затримок в мережі з експлуатаційним вантажообігом, що характеризує навантаження на залізничну мережу за період 2006-2019 рр [23].

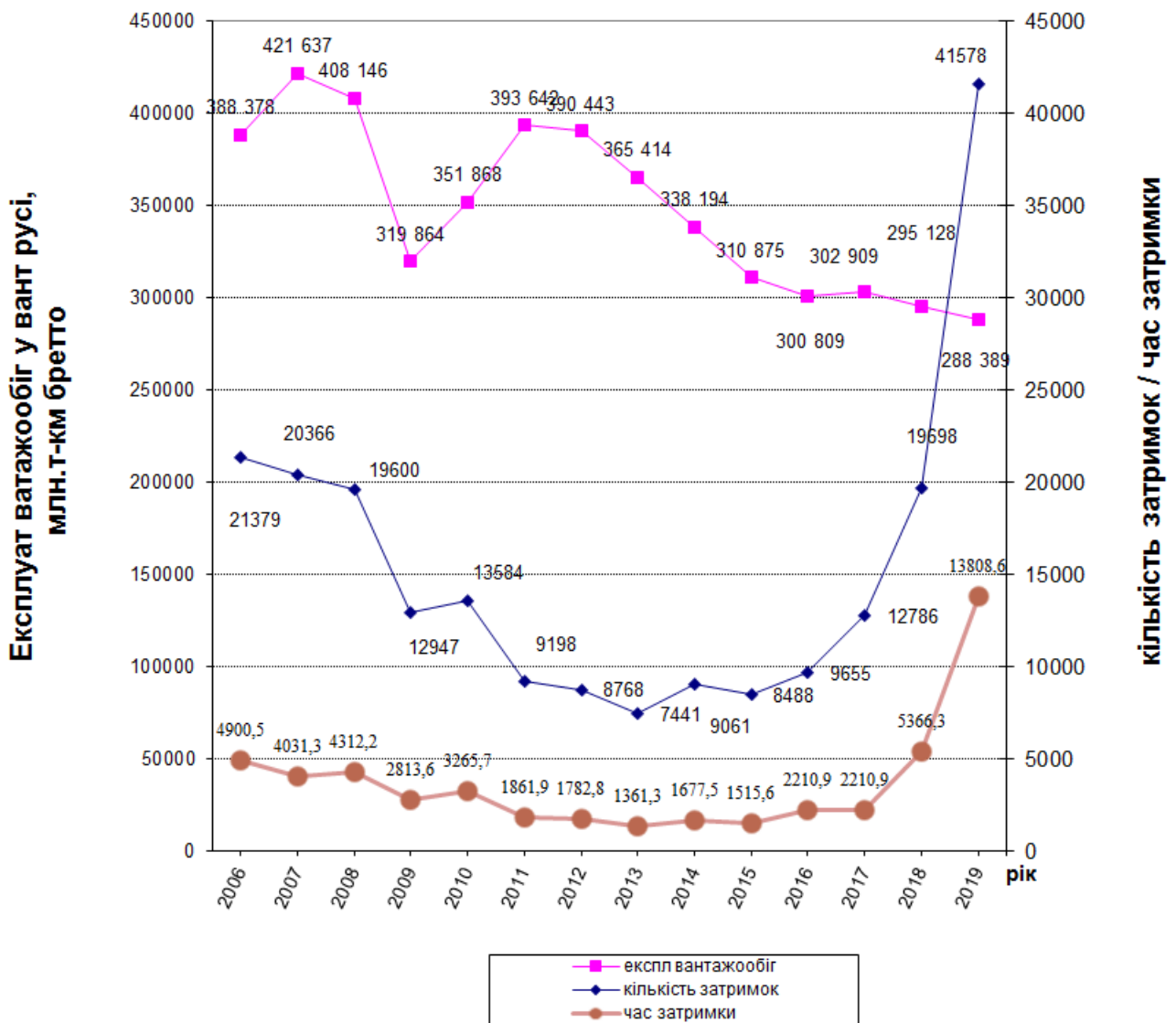


Рисунок 1.9 – Діаграма залежності експлуатаційного вантажообігу у вантажному русі до розподілу кількості та тривалості затримок поїздів біля вхідних світлофорів на залізниці України за період 2006-2019 рр

Згідно аналізу діаграми на рисунку 1.9 кількість затримок у 2019 році збільшилась в 4,6 рази у порівнянні з 2015 роком. Це свідчить про значні проблеми в перевізному процесі декілька останніх років. Згідно до даних детальної довідки про затримку поїздів по станціям дирекцій регіональної філії “Південна залізниця” більше 12 годин за період звітних дат з 01.09.2019 по

31.01.2020 були отримані дані щодо кількості та тривалості простою “кинутих” поїздів (рис. 1.10).

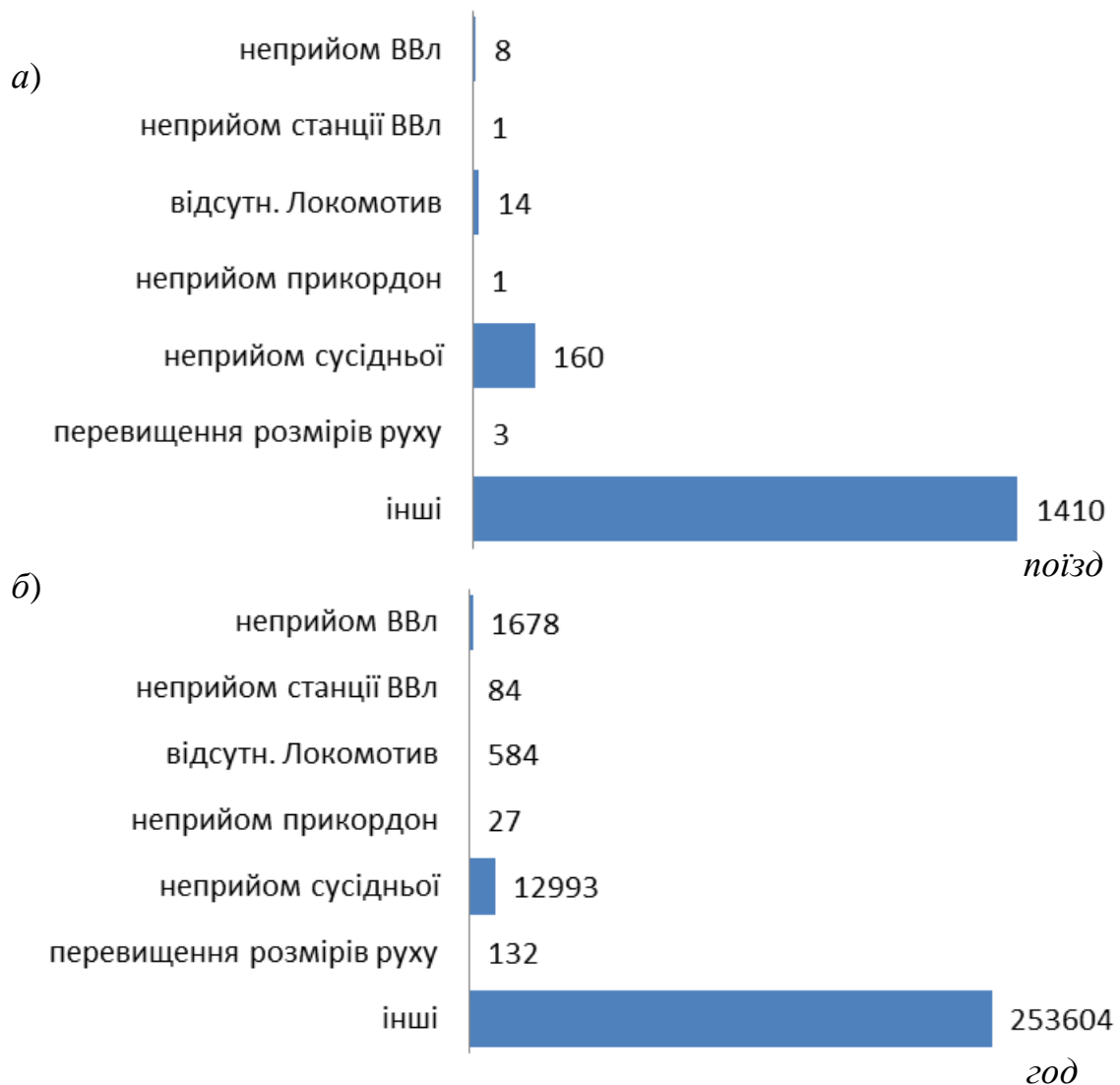


Рисунок 1.10 – Діаграма аналізу причин кинутих поїздів на станціях дирекції регіональної філії “Південна залізниця” більше 12 годин: *а* –кількість “кинутих” поїздів; *б* – тривалість “кинутих” поїздів

Аналіз причин кидання (рис. 1.10*а,б*) показав, що протягом шести місяців 1597 поїздів було зупинено і залишено без локомотива, з яких 160 поїздів були зупинені лише з причини неприймання сусідньої регіональною філією, тобто з причини відсутності узгодженого графіка руху між філіями єдиної залізничної

мережі. Простій 160 кинутих поїздів сумарно склав близько 13 тисячі годин, що нанесло залізниці колосальних збитків. На рисунку 1.11 наведено діаграму середнього простою кинутих поїздів з віднесенням за причинами. Середній простій кинутого поїзда досягав 270,6 годин, тобто 11,3 доби, що є неприпустимо для надійної залізничного транспорту.

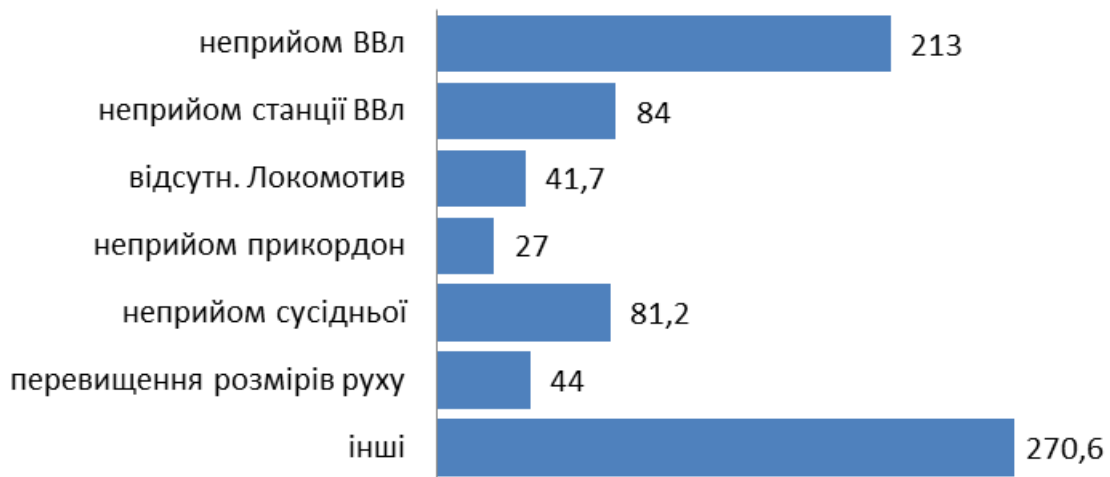


Рисунок 1.11 – Діаграма середнього простою кинутих поїздів з віднесенням за причинами на станціях дирекцій регіональної філії “Південна залізниця” більше 12 годин за період звітних дат з 01.09.2019 по 31.01.2020 (годин)

Аналіз рівня виконання нормативного графіка руху поїздів на мережі АТ “Укрзалізниця” свідчить про досить високі показники точності (рис. 1.12)

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

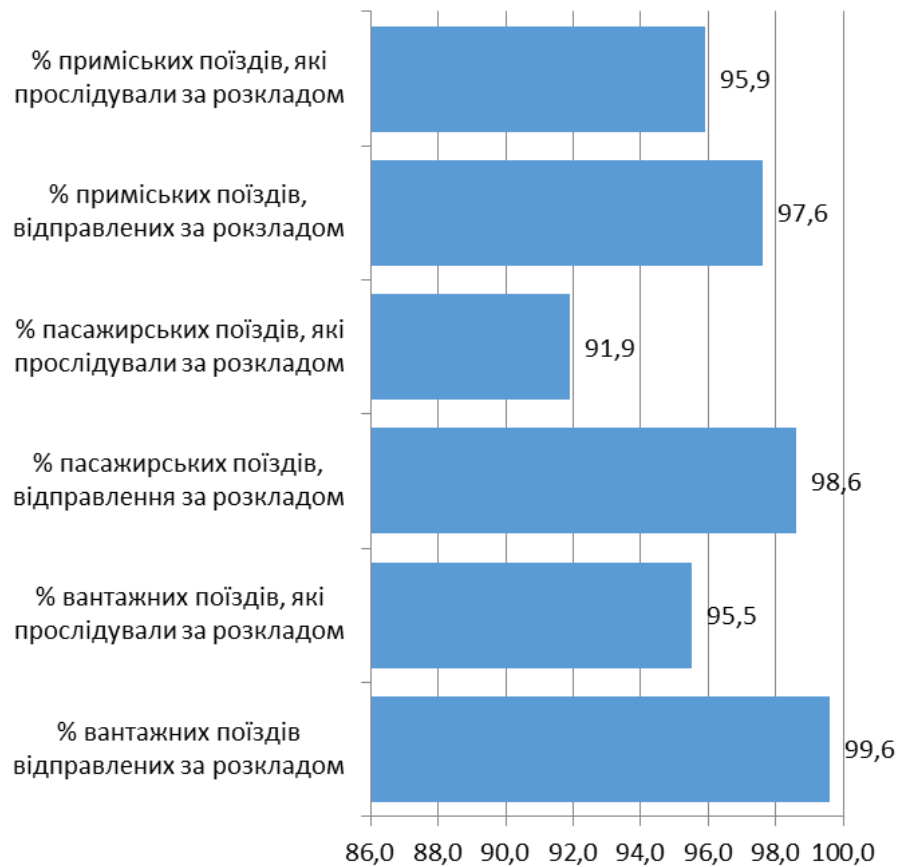


Рисунок 1.12 – Діаграма розподілу рівня виконання нормативного графіка руху поїздів різних категорій за 2019 р

Графік відправлення вантажних поїздів на мережі філії “Південна залізниця” АТ “Укрзалізниця” у 2019 році склав 96,3%, пасажирських - 99,2%, приміських - 99,1%. Згідно даних були побудовані кругові діаграми (рис. 1.13) на яких наведено, що із запізненням прослідувало 8123 поїзди із сумарною затримкою у 5648,6 годин, а найбільша частка затримок поїздів відбулась з вини служби вагонного господарства (41% від зальної кількості) та локомотивного (32% від зальної кількості). З аналізу виявлено, що в межах причин затримок за локомотивним господарством значна частка припадає на вплив невитримки перегінного часу руху.

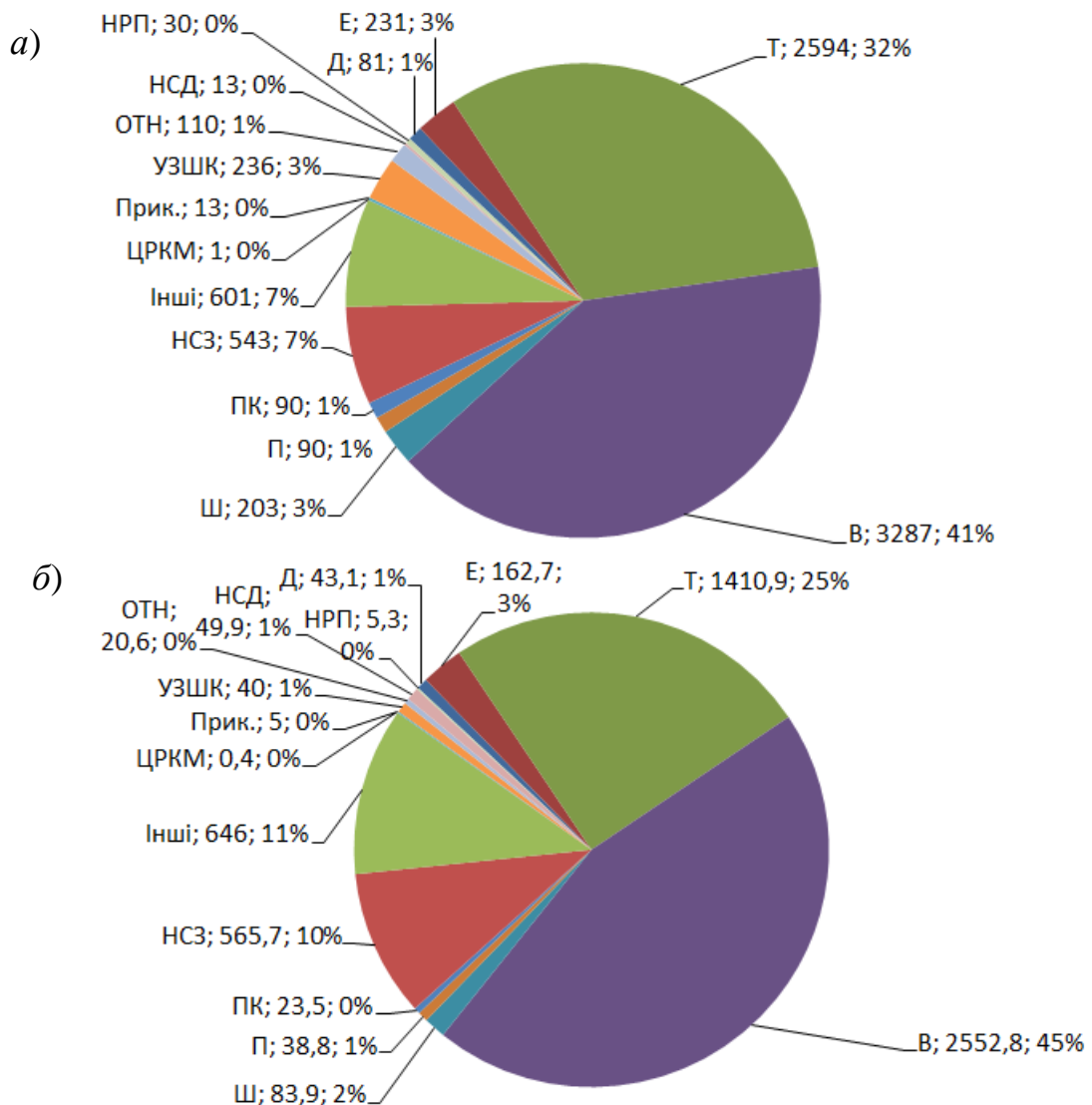


Рисунок 1.13 – Розподіл затримок вантажних поїздів за причинами: а – кількість затриманих поїздів (поїзд); б – тривалість затримок (год)

На рисунку 1.14 наведено розподіл кількості затримок за різними категоріями поїздів з причини локомотивного господарства – невитримка перегінного часу руху. Найбільше випадків – 1724 припадає на вантажний рух. Це доводить відсутність дієвого методу встановлення резервів часу у нитках графіка в АТ “Укрзалізниця” для зменшення кількості затримок поїздів і, як наслідок, зниження витрат.

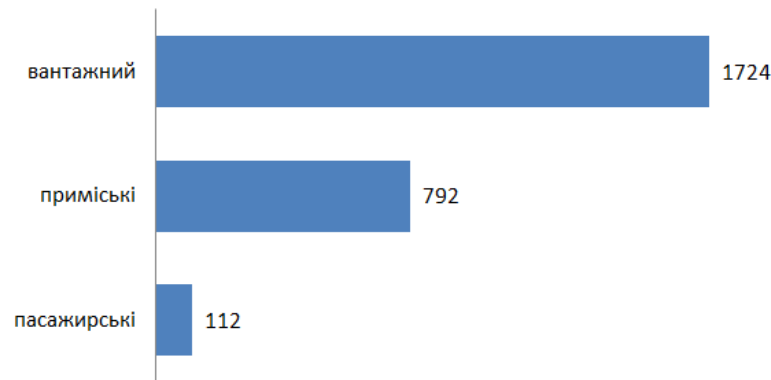


Рисунок 1.14 – Діаграма розподілу кількості випадків затримок поїздів різних категорій з причини невитримки перегінного часу руху за 2019 р

Рівень виконання графіка руху досить високий, що може свідчити про недіючість якісної системи обліку виконання графіка руху. Це доводить показник порушення термінів доставки вантажних відправок в залізничній системі України достатньо високий і складає 15792 порушення, тобто в середньому за добу порушувалась доставка у 43.3 відправки (рис. 1.15).



Рисунок 1.15 – Діаграма розподілу порушення термінів доставки за грудень 2019 року на мережі АТ “Укрзалізниця”

Відсутність надійності руху поїздопотоків призводить до значних збитків для АТ “Укрзалізниця” (рис. 1.16). За 2019 рік АТ “Укрзалізниця” виплатила

8,5 мільйонів гривень. У порівнянні з 2018 роком у 2019 році виплати збільшилися у 3,86 рази.

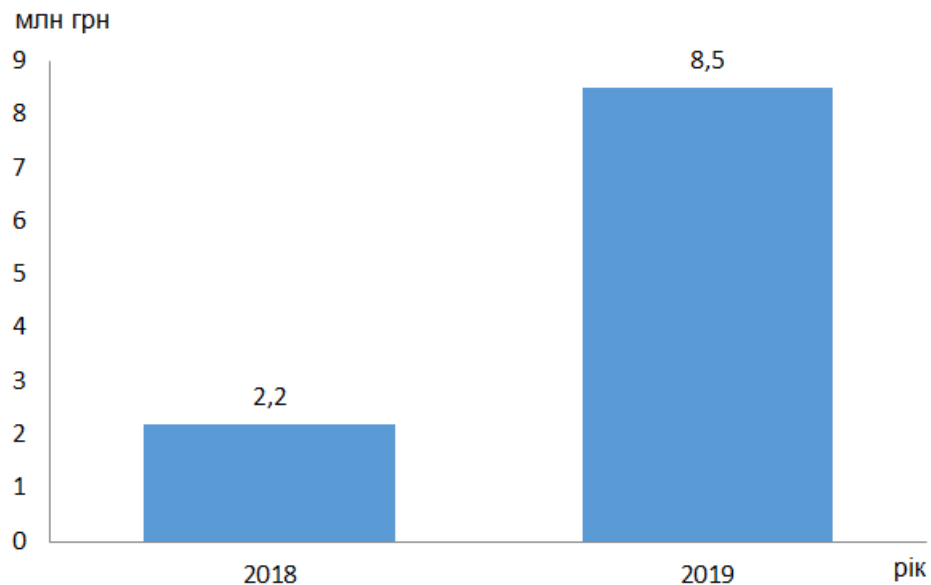


Рисунок 1.16 – Динаміка виплати штрафів за несвоєчасну доставку вантажів

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

1.3. Порівняльний аналіз підходів до встановлення резервів часу у графіку руху поїздів згідно стандарту Міжнародного союзу залізниць UIC 451-1 OR та нормативного методу АТ “Укрзалізниця”

Важливо визначити основні складові фактичного часу руху поїздів по дільниці. Згідно до UIC 451-1 OR [32] нормативний час руху (нитка) поїзда

складається з основного часу руху (англ., basic running time), часу для відновлення (англ., recovery margin) і додаткового часу (англ., supplementary margin), рис. 1.17.

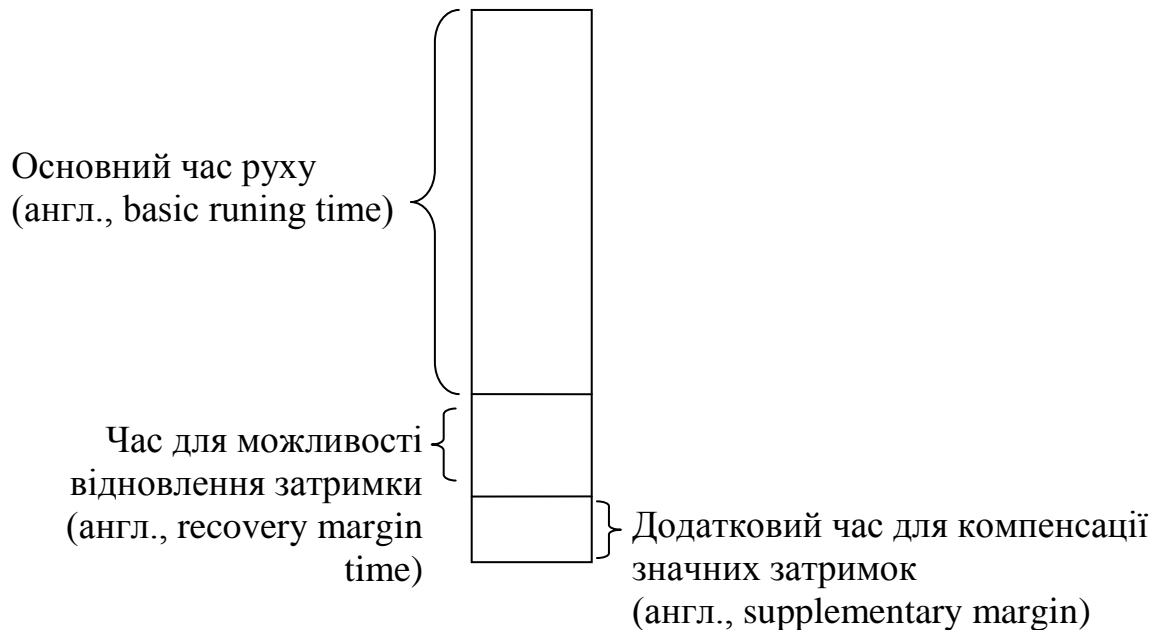


Рисунок 1.17 – Розподіл нормативного часу руху поїзда на складові згідно стандарту UIC 451-1 OR

Основний час руху, або мінімальний час руху поїзда по перегону, залежить від ходових якостей рухомого складу, характеристик інфраструктури та постійно діючих обмежень. Слід зазначити, на залізницях України, перегінний час ходу, розгону і сповільнення поїздів встановлюється тяговими розрахунками згідно з діючими “ Правила виконання тягових розрахунків для поїзної роботи” [33], виходячи з норми маси (уніфікованої або паралельної) та з урахуванням усієї сукупності постійних та довготривалих попереджень про обмеження швидкості на перегонах і станціях.

Час для відновлення у нитці допускається з метою компенсації затримок, які з’являються випадково, так звані первинні затримки та утворення послідовності (каскаду) затримок з причини первинної затримки, так звані вторинні затримки [28,34]. Згідно UIC 451-1 OR даний час призначений для компенсації наступних причин затримок:

- тимчасові обмеження швидкості з причин проведення періодичних ремонтних робіт, тощо;
- випадкові події з причин технічних інцидентів, впливу погодних умов або втручання у роботу залізниць третіх сторін, затримки поїздів, що слідують взаємопов'язаними нитками графіку, затримки за відправленням, затримки з причин руху поїздопотоків в умовах вичерпаної пропускної спроможності елементів залізничної інфраструктури.

Додатковий час у нитці призначений для компенсації затримок, що виникають при проведенні довгострокових значних ремонтних і будівельних робіт, які вимагають зменшення швидкості або зупинки в дорозі (ремонт колії, пристроїв контрактної мережі, переїзної сигналізації, штучних та інших споруд на перегонах та станціях дільниці).

Виділений час для відновлення у нитці може бути розподілений трьома способами в різних пропорціях [32]:

- 1 надання резерву часу під час руху (англ., running time supplements). На залізницях України даний резерв має назву час на нагін або час для можливості прискорення ходу поїзда у порівнянні з передбаченим розкладом;
- 2 надання резерву часу до нормативної тривалості зупинки поїзда на станції (англ., dwell time supplements);
- 3 надання резерву часу до міжпоїзного інтервалу між двома нитками поїздів (англ., buffer times between trains).

Компенсація під час руху полягає у використанні різниці між мінімальним часом слідування поїзду по дільниці та часом, що запланований розкладом, що містить дві складові:

- час регулярної добавки додається до часу слідування поїзда по кожній дільниці відповідно до вимог компанії, що управляє інфраструктурою (далі за текстом менеджер інфраструктури). Приймається різною в залежності від дальності слідування поїзда, часу слідування та величини стоянки на станціях;

– час спеціальної добавки додається у випадку проведення великих за обсягом ремонтних робіт або наявності дільниць з несприятливим профілем на шляху прямування поїзда. Дана величина часу є фіксованою. На рис. 1.17 наведено графічне представлення компенсації під час руху поїзда на основі нагону.

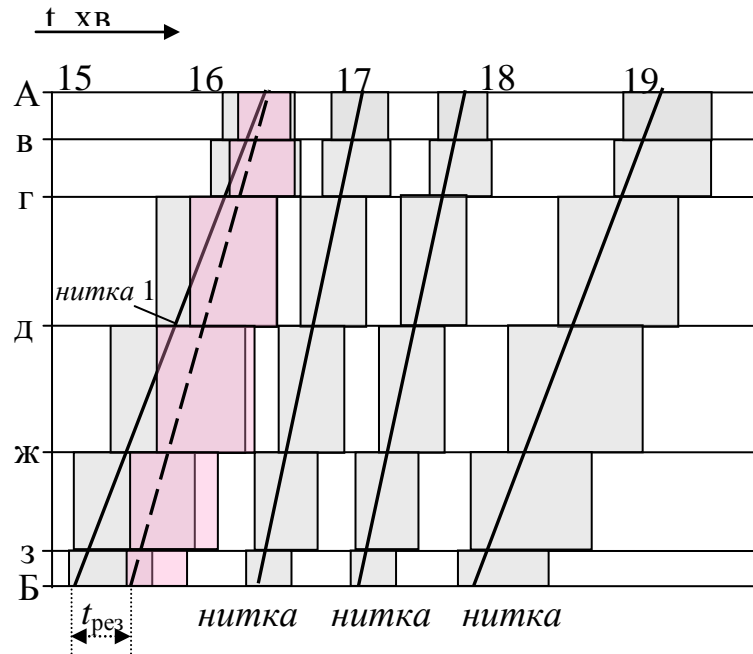


Рисунок 1.18 – Графічне представлення компенсації затримки під час руху поїзда на основі нагону (пунктирна лінія ходу пасажирського поїзда)

Компенсація під час затримки поїзда на станції полягає у використанні середньої уніфікованої фіксованої величини, що додається до кожного поїзда при розробці ГРП. Більшість операторів інфраструктури використовують цю величину та отримують ряд переваг:

– час зупинки на станції може бути подовжено за рахунок посадки-висадки організованих груп школярів або пасажирів з обмеженими можливостями. Надання резерву часу до нормативної тривалості зупинки поїзда на станції може поглинати дану затримку. Це дозволяє уникати передачі затримок на поїзди, які зв'язані плановою пересадкою з поїздом, що затримується (рис. 1.17);

– при прибутті на станцію поїзда, що слідує із затримкою, цей час також може компенсувати затримку. Необхідною умовою реалізації такого варіанту є наявність необхідної кількості приймально-відправних колій на станціях дільниці.

Виділений час для відновлення може бути визначений трьома способами:

- визначення часу для відновлення в залежності від пройденої відстані [хв/км];
- визначення часу для відновлення в залежності від часу руху поїзда через дільниці [%];
- встановлення фіксованої величини часу відновлення на станції або залізничному вузлі [хв].

МСЗ згідно UIC 451-1 OR [32] рекомендує для всіх залізниць використання фіксованого мінімального часу резерву за трьома вище наведеними способами. Залізничний рух запропоновано розділити на наступні категорії:

- пасажирські поїзди локомотивної тяги (≤ 300 , 301-500, 501-700 і >700 тонн), див. таблицю 1.1.
- рух пасажирських поїздів за розподіленою тягою (моторвагонні поїзди), див. таблицю 1.2.
- вантажні поїзди, див. таблицю 1.3.

Для пасажирських поїздів локомотивної тяги UIC 451-1 OR [32] рекомендує 3 хвилини/100км + фіксована добавка: 1 або 1,5 хвилини/100 км, (таблиця 1.1). Ця категорія поїзда поділяється на підгрупи в залежності від загальної ваги поїзда.

Для моторвагонних пасажирських поїздів фіксована тривалість добавки 1хв/100км з додаванням відсотку приросту, що залежить від швидкості руху як показано в таблиці 1.2 [32].

Таблиця 1.1 – Рекомендовані згідно UIC 451-1 OR відсотки від тривалості руху резерву часу для пасажирських поїздів локомотивної тяги [32]

Маса, тонн	Швидкість поїзда, км/год			
	≤ 140	141-160	161-200	>200
≤300	3%	3%	4%	5%
301-500	4%	4%	5%	6%
501-700	4%	5%	6%	7%
>700	5%	5%	6%	7%

Вантажні поїзди поділяються за швидкістю – до і вище 120км/год, (табл., 1.3). До 120 км/год резерв складає 3хв/100км або 4% від тривалості руху.

Таблиця 1.2 – Рекомендовані згідно UIC 451-1 OR відсотки від тривалості руху резерву часу для моторвагонних пасажирських поїздів

Швидкість поїзда, км/год				
≤ 140	141-160	161-200	201-250	>250
3%	4%	5%	6%	7%

Таблиця 1.3 – Рекомендовані згідно UIC 451-1 OR час виконання добавок для вантажних поїздів

Швидкість поїзда, км/год	
≤120	>120
- 1 хв/100км + 3% від часу руху або -3 хв/100км або - 4% від часу руху поїзда дільницею	Як для пасажирських – згідно табл. 1.1

Аналіз практики встановлення часу відновлення на різних залізницях світу свідчить, що результати визначення часу для відновлення в залежності від пройденої відстані та від часу руху поїзда через дільниці майже однакові в діапазоні швидкостей звичайного руху поїздів [35]. Однак в діапазоні швидкостей високошвидкісного руху резерв часу збільшується. Наприклад, на швидкісних та високошвидкісних лініях для ниток руху моторвагонних пасажирських поїздів, час для відновлення в залежності від часу руху поїзда через дільниці може змінюватися в межах від 3% до 7% в діапазоні швидкостей більше 140 км/год.

Важливо виконати порівняння методу додавання резерву згідно UIC 451-1 OR з діючими нормативами АТ “Укрзалізниця”. Для забезпечення стійкого виконання графіка руху поїздів у процесі його розробки передбачаються певні резерви, які на кожній дільниці не повинні перевищувати значення, розраховані за спеціальною формулою, яка визначає додатковий час, що залежить від прийнятого рівня надійності графіку руху поїздів та коефіцієнту швидкості, які встановлюються за “Інструкція зі складання графіка руху поїздів на залізницях України (Цд-0040)” [33]. Дана формула має вид:

$$T_{резерв} = T_{прийн} (1 - K_n) K_v, \quad (1.1)$$

де $T_{прийн}$ – прийнятий час ходу на дільниці, хв; K_n – коефіцієнт надійності, $K_n = 0,93 \div 0,99$; K_v – коефіцієнт швидкості,

$$K_v = \frac{V_{розрах}}{V_{сзв}}, \quad (1.2)$$

де $V_{розрах}$ – розрахункова швидкість руху по дільниці, км/год; $V_{сзв}$ – середньозважена швидкість, яка розраховується з урахуванням швидкості руху і протяжності її дії на перегонах дільниці і головних коліях станцій, км/год.

$$V_{сзв} = \frac{S}{T_{розрах}}, \quad (1.3)$$

де $T_{розрах}$ – розрахунковий час ходу на дільниці; S – довжина дільниці.

Рекомендовані значення K_n визначаються згідно таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Рекомендовані значення коефіцієнта надійності K_n

Швидкість, км/год	Значення K_n
120 і більше	0,93
110	0,94
100	0,95
90	0,96
80	0,97
70	0,98
60	0,99

Крім вище зазначеного резерву в Інструкції [33] згадуються деякі узагальнені правила встановлення перезрвів часу у нормативному ГРП, зокрема:

- на одноколійних лініях вільні смуги – інтервали необхідно виділяти на обмежуючому перегоні. Тривалість такого інтервалу повинна дорівнювати часу руху поїзда по цьому перегону. Між вільними смугами повинно прокладатися 10–12 % добової кількості вантажних поїздів.

- на двоколійних лініях вільні смуги треба виділяти у кожному напрямку із зміщенням. Зміщення вільних смуг дозволяє мати у графіку після пропуску 5 % добової кількості поїздів деякий резерв у часі, що й створює можливість в оперативних умовах змінювати порядок пропуску поїздів та ліквідувати тим самим відхилення від розкладів, що виникли.

- після обгону або схрещення відправлення поїзда зі станції необхідно виконувати відразу через мінімально можливий за умовами безпеки станційний інтервал.

-для створення умов стійкого виконання графіка руху на двоколійних лініях після пропуску 8 – 10 % добової кількості поїздів треба передбачати збільшений на 6 – 8 хвилин інтервал. Наявність такого інтервалу дозволяє скоротити вплив відхилень перегінних часів руху від нормативів на дільничну швидкість вантажних поїздів.

Для перевірки відповідності діючих нормативів АТ “Укрзалізниця” з вимогами стандарту UIC 451-1 OR та діючими величинами закладених резервів в даній дисертації проведені розрахунки, що представлені у Додатку А. 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 4,7 хвилини або на 22,5%; для пасажирських – завищення на 2,22 хвилини або на 50,8%; для приміських – заниження на 2,76 хвилини або 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 [33] 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. Як показує практика удосконалення роботи залізниць світу [36-40], для виключення експертного підходу впроваджуються автоматизовані системи розробки нормативних ГРП в межах процедури складання яких автоматизується процедура визначення резервів часу у нитках графіка.

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

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

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

Закладання раціонального резерву часу в графік руху поїздів є складним завданням для залізниць, тому що слід задовольнити потреби часу перевезення не тільки пасажирів, а й вантажовідправників та самої залізниці для уникнення збитковості [41, 42]. Дослідженням в напрямі пошуку ефективних методів встановлення резервів часу у графіку руху поїздів присвячено багато праць. Зокрема, у своїх дослідженнях [43] порівнює ефективність різних стратегій застосування резервів часу у розкладах руху на залізниці Данії з рекомендаціями УІС. У роботі [44] на основі аналізу затримок поїздів на залізницях Голландії, Швейцарії, Німеччини були визначені порогові значення затримок для різних категорій поїздів в цих країнах. Дослідження [45] було зосереджено на огляді стану практики та існуючих процедур планування розкладу на основі правил залізничних адміністрацій з кількох європейських

країн. Виявлена низка недоліків в розробці графіка руху, одним з яких є відсутність дієвих інструментів моделювання, оптимізації та методів аналізу даних для покращення розкладів.

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

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

спроможності на тривалість руху поїздів. Однак, даний підхід дозволяє тільки виявити проблеми надійності графіка руху поїздів, встановити тривалість руху поїздів, але не призначений до визначення раціональних резервів часу у ГРП.

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

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

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

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

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

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

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

Деякі роботи присвячені дослідженням стабільності розкладів поїздів на основі статистичних аналізів реальних даних щодо виконання графіків руху поїздів [78, 79, 80]. Наприклад, робота [81] присвячена аналізу виконання графіка руху поїздів на мережі інфраструктурної компанії DB Netze AG за допомогою використання методів аналізу Big Data. У [82] запропоновано метод прогнозування затримок поїздів для залізничної лінії Beijing-Guangzhou в Китаї

на основі моделі регресійних дерев з посиленням градієнтом (The gradient-boosted regression trees model, GBRT). В роботі [83] для прискорення виявлення проблем у розкладах запропоновані способи візуалізації та статистичної обробки даних щодо затримок поїздів в залізничній мережі. Однак, статистичний підхід до вивчення поширення затримок поїздів дозволяє дослідити лише варіанти, що виникали в історичній ретроспективі і не надає можливості отримати реакцію залізничної мережі у випадку виникнення затримок, які були відсутні в періоді, що досліджувався.

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

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

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

спрямовані на формалізацію динаміки поширення затримок поїздів на топологіях великих мереж [90,91]. Одним із перспективних напрямів моделювання розповсюдження затримок поїздів на макрорівні є застосування модифікованих епідеміологічних математичних моделей, що використовуються для моделювання епідемій, розповсюдження вірусів, тощо. Як приклад, можна навести роботи в галузі авіаційного транспорту [92], де для моделювання поширення затримок в мережі аеропортів використано епідемічну модель типу SIS. Проведені перевірки побудованих моделей на даних польотів в Європі довели реалістичність отриманих результатів. В роботі [93] було застосовано модель динаміки поширення затримок у складних мережах повітряного транспорту на основі модифікованої епідеміологічної SIR-моделі. Для підвищення точності моделювання в моделі введено обмеження на використання 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 [94] автори застосовують готовий програмний продукт LinTim без модифікацій алгоритму. Результати моделювання дозволяють припустити, що розповсюдження затримки поїздів має аналогічне підґрунтя з механізмом розповсюдження інфекційних хвороб. В роботі [95] використано модель SIR для імітації поширення затримки по всій залізничній транзитній мережі Нідерландів. Запропоновано евристичний підхід для визначення частоти зараження. В результаті модель адекватно імітує процеси виникнення великих затримок. Однак система руху поїздів в мережі ґрунтується на періодичних розкладах руху і не може бути застосована до мереж, подібних українській. Крім того, дана модель не враховує обмеження на пропускну спроможність дільниць між станціями в мережі та їх ступінь завантаженості, що могло б дозволити підвищити точність моделювання. Успішним прикладом

застосування епідеміологічної моделі є робота [96], де запропоновано математичну SIR модель для дослідження перевантажень в пасажирській міській залізничній мережі та кількісно оцінено вплив різних факторів, зокрема пропускної спроможності на швидкість поширення затримки. Однак, застосування такої моделі для визначення резервів часу у графіку руху залізничних мереж змішаного руху пасажирських і вантажних поїздів без дотримання останніх розкладу руху неможливо. У дослідженні [91] запропонована SIS-модель поширення епідемії, яка здатна відтворювати емпіричний розподіл затримок поїздів. Даний підхід передбачає можливість виникнення декількох затримок для одного поїзда. Результати моделювання в умовах руху поїздів за розкладом в італійській залізничній мережі підтвердив адекватність математичної моделі реальним процесам розповсюдження затримок.

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

1.5.Висновки до розділу 1

1. Аналіз умов функціонування залізничного транспорту України при діючій системі закладення резервів часу у графіку руху поїздів виявив погіршення експлуатаційних показників АТ «Укрзалізниця». При незмінних технологіях перевезень і відсутності відновлення основних фондів залізнична

система України стабільно зменшує обсяги перевезень вантажів. Змінюється структура вагонопотоків на залізниці України. Частка масових вантажів в загальних обсягах перевезення вантажів зменшується, так у 2019 році в порівнянні з 2015 роком відсоток вугілля зменшився на 14%, руда – на 10 %, кокс – на 3%. Однак, високомаржинальні вантажі показують зростання, збільшуються інтермодальні перевезення та зростають обсяги аграрної продукції (хлібні) – збільшились у 2019 році на 11% в порівнянні з 2015 роком. Саме логістика високомаржинальних вантажів потребує підвищення надійності перевізного процесу про що свідчить високий рівень конкуренції в даному сегменті перевезень з автомобільним транспортом. Отже, для забезпечення конкурентоспроможності та прибутковості залізничного транспорту необхідно підвищувати точність руху власних поїздопотоків.

2. 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» складав 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. Одним із напрямів дотримання встановленої точності та пунктуальності ГРП є закладання раціонального резерву часу в графік руху поїздів.

3. 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 4,7 хвилини або на 22,5%; для пасажирських – завищення на 2,22 хвилини або на 50,8%; для приміських – заниження на 2,76 хвилини або 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.

4. Аналіз змін операційних моделей залізниць світу доводить, що операційна модель залізничної галузі має єдиний тренд розвитку, що ґрунтується на підвищенні точності та надійності руху поїздопотоків. Крім того, в межах запланованого вертикального розділення АТ “Укрзалізниця” виникає необхідність кращої координації та дотримання наданого компаніям-перевізникам графіка руху поїздів. Такий підхід вимагає планування операцій в часі і просторі з можливістю закладення резервів часу для їх реалістичного виконання на кожен день.

5. Аналіз теоретичних і практичних досліджень щодо встановлення раціональних резервів часу в графіку руху поїздів доводить, що найбільш точні методи визначення резервів на основі моделювання поширення затримок поїздів. Виявлено, що макроскопічний підхід до моделювання поширення

затримок поїздів може більш адекватно описати невизначеність параметрів системи руху потоків поїздів без дотримання графіка руху в мережі. Результативними є дослідження спрямовані на представлення характеристик процесів поширення інфекційних захворювань подібними до поширення затримок поїздів. За таких умов, запропоновано розробити метод дослідження впливу величини резерву часу на надійність графіку руху поїздів на основі епідеміологічної моделі.

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

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

Для залізничних систем без дотримання графіка руху вантажних поїздів, до яких відноситься залізниця України, правила встановлення резервів часу у нитці поїздів різних категорій є досить загальними, що потребує проведення досліджень впливу поїздів різних категорій та величини їх резерву часу на надійність графіка руху на дільниці [3]. Враховуючи, що найбільш невивченим є час для відновлення у нитці, що розподілений за способом компенсації під час руху (англ., *running time supplements*) [32]. Компенсація під час руху полягає у використанні різниці між мінімальним часом слідування поїзду по дільниці та часом, що запланований розкладом та містить складову – час регулярної добавки, який додається до часу слідування поїзда по кожній дільниці відповідно до вимог оператора інфраструктури. Величина добавки (резерв часу) у різних залізничних системах є різною в залежності від дальності слідування поїзда, часу слідування та стоянки на станціях. Цей резерв часу у випадку запізнення поїзда дозволяє виконати операцію нагін – прискорення ходу поїзда у порівнянні з передбаченим плановим розкладом з метою скорочення запізнення та уникнення сценаріїв каскадних затримок із значними витратами. На рис. 2.1 наведено один із можливих практичних прикладів застосування операції нагону при виникненні первинної затримки у графіку руху поїздів на умовній двоколійній дільниці А-Б.

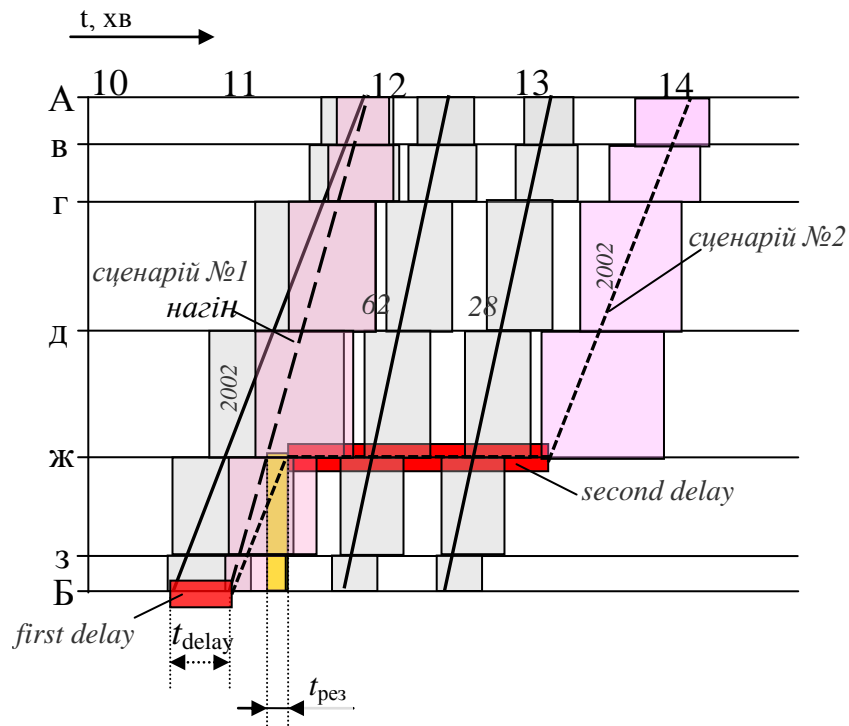


Рисунок 2.1 – Схема сценаріїв руху поїздів при виникненні затримки на двоколінійній дільниці: сценарій 1 – реалізація операції нагін; сценарій 2 – виконання операції обгону з пасажирськими поїздами

За відправленням зі станції Б у вантажного поїзду №2002 виникла первинна затримка тривалістю $t_{\text{delay}} = 14$ хвилин при якій існує два сценарії розвитку подій. Запізнення передбачає розвиток другого сценарію за яким неминучим є зупинка поїзда №2002 на станції ж для виконання операції обгону (з простоєм 24 хв) пасажирських поїздів, що слідують пачкою згідно нормативного розкладу з вищим пріоритетом. У випадку існування резерву часу - компенсації під час руху, розвиток подій може змінитись на сценарій 1, який передбачає передачу наказу від диспетчера машиністу вантажного поїзда №2002 для можливості прискорення останнього на першому перегоні Б-з на 2 хвилини, на другому з-ж на 4 хв; третьому перегоні ж-д на 5 хвилин; четвертому перегоні д-г на 5 хвилини; на перегоні г-в на 4 хвилини, що дозволить вантажному поїзду №2002 прибути на станцію А у відповідності до

нормативного розкладу руху поїздів. Один із прикладів розвитку сценаріїв в практичних умовах реалізації графіка руху доводить ефективність існування резерву у вигляді компенсаційного часу в нитці графіка. Однак, при виборі занадто великого резервного часу збільшується тривалість заняття поїздом інфраструктури дільниці, що призводить до зменшення дільничної швидкості руху та пропускної спроможності дільниці. За таких умов важливим є вирішення завдання пошуку раціональних величин компенсаційного часу в нитках графіку поїздів різних категорій. Це дозволить знайти баланс між надійністю графіка руху та практичною пропускною спроможністю залізничної дільниці [98, 99].

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

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

Таким чином, загальну кількість ниток поїздів (вантажні та пасажирські) слід розділяти умовно на групи: чутливі до затримки поїзди, які в момент часу

слідують за графіком але потенційно можуть бути затримані при русі на дільниці (англ., Susceptible); поїзди, що слідують із затримкою та впливають на слідування інших поїздів, передаючи їм затримку (англ., Infected); поїзди, що за час слідування через залізничну дільницю з затримкою, поглинули її (виконали нагін), слідують за графіком, та не впливають на виникнення затримок в подальшому русі (англ., Removed) [1,8,9,12]. На рис. 2.2 наведено граф процесу переходу поїздів між станами на дільниці.

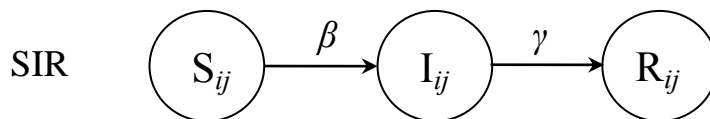


Рисунок 2.1 – Граф процесу переходу поїздів між станами на дільниці

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

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

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

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

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

де S^r – кількість сприятливих поїздів в класі r на дільниці, поїздів; $\beta^{r,l}$ – швидкість розповсюдження затримки від поїздів класу r до поїздів класу l на дільниці, год⁻¹, де $r=l$, $r,l \in R$; I^l – кількість інфікованих поїздів класу l на

дільниці, поїздів; R^r – кількість поїздів класу r , що слідували з затримкою, але поглинули її, поїздів; γ^r – швидкість відновлення затримки у поїздів класу r на дільниці; t – час або крок моделювання, година. Всі параметри системи мають додатні значення.

Система рівнянь має умову нормування виду $N^r = S^r(t) + I^r(t) + R^r$, де N^r – загальна кількість поїздів класу r на дільниці, $N = \sum_r N^r$, N – загальна кількість поїздів всіх класів на дільниці. Початкові умови для системи (2.1) рівні $(S_0^r, I_0^r, 0)$, де S_0^r, I_0^r – кількість сприятливих та затриманих поїздів в класі r на дільниці при $t = 0$ відповідно.

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

2.3. Розробка методу пошуку коефіцієнтів швидкості розповсюдження затримки математичної моделі

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

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

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

Для реалізації оптимізаційної задачі (2) в межах генетичного алгоритму змінні моделі представлено у формі хромосоми фіксованої довжини з урахуванням обмежень на їх діапазони і зведенням їх в один числовий вектор

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

де $h = \overline{1, K}$ – номер хромосоми C , $\beta^{r,l} \in \{3 \times 3\}$ або $C^h = [1 \times 9]$, а змінна має обмеження $0 \leq \beta^{r,l} < 1$. Розв’язок системи диференційних рівнянь (2.1) в межах фітнес функції GA запропоновано виконати чисельним методом Рунге-Кутта 4-го порядку [109,110]. Критерієм оцінки підбору змінних в оптимізаційній задачі (2.2) застосовано середню абсолютну похибку (MAPE) між емпіричними та модельними результатами [112,113]

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

де показник $F(\beta)$ не визначений для нульових значень $I_m^r(t)$, M – кількість строк векторів експериментальних даних вибірки $\langle \bar{X}_q, \bar{y}_q \rangle$, $q = \overline{1, M}$; $I^r(t)$ – вихідний вектор вибірки $\langle \bar{X}_q, \bar{y}_q \rangle$, $I^r(t) \in \bar{y}_q$; $I_m^r(t)$ – результат розв’язку системи диференційних рівнянь (1) при початкових умовах $(S_0^r, I_0^r, 0)$, що відповідають q -й строчці вибірки $\langle \bar{X}_q, \bar{y}_q \rangle$, $(S_0^r, I_0^r, 0) \in \bar{X}_q$.

2.3.1. Обробка експериментальних даних та підбір параметрів швидкості розповсюдження затримки математичної моделі SIR

Для можливості отримання точних даних щодо поширення кількості затриманих поїздів в часі на розрахунковій залізничній дільниці з урахування впливу різних категорій поїздів в роботі був розроблений спеціальний алгоритм здобуття даних. Для генерування затримок поїздів різних категорій та їх поширення в графіку руху в роботі використана оптимізаційна математична модель [34]. Згідно до розробленої процедури виконано моделювання поширення затримки поїздів у робочому графіку руху за 2017-2018 років на залізничній лінії Л–С регіональної філії “Південна залізниця” АТ “Укрзалізниця” [3].

В експериментальних дослідженнях було виконано три сценарії за якими моделювалась затримка одного поїзду з прийнятого класу r з незмінними параметрами інфраструктури та нормативного графіка руху. Затримка модулювалась в непарному напрямку руху за відправленням зі станції Л з величиною 25,17 хвилин, відповідно до досліджень [34]. Початкові умови при $t = 0$ для моделювання поїздів $N^{r=1} = 9$ поїздів, $N^{r=2} = 4$ поїздів, $N^{r=3} = 32$ поїздів. Візуалізація графіків залежностей кількості затриманих поїздів різних

класів з наростаючим підсумком від моменту виникнення модельної затримки пасажирського поїзда наведена на рис. 2.3.

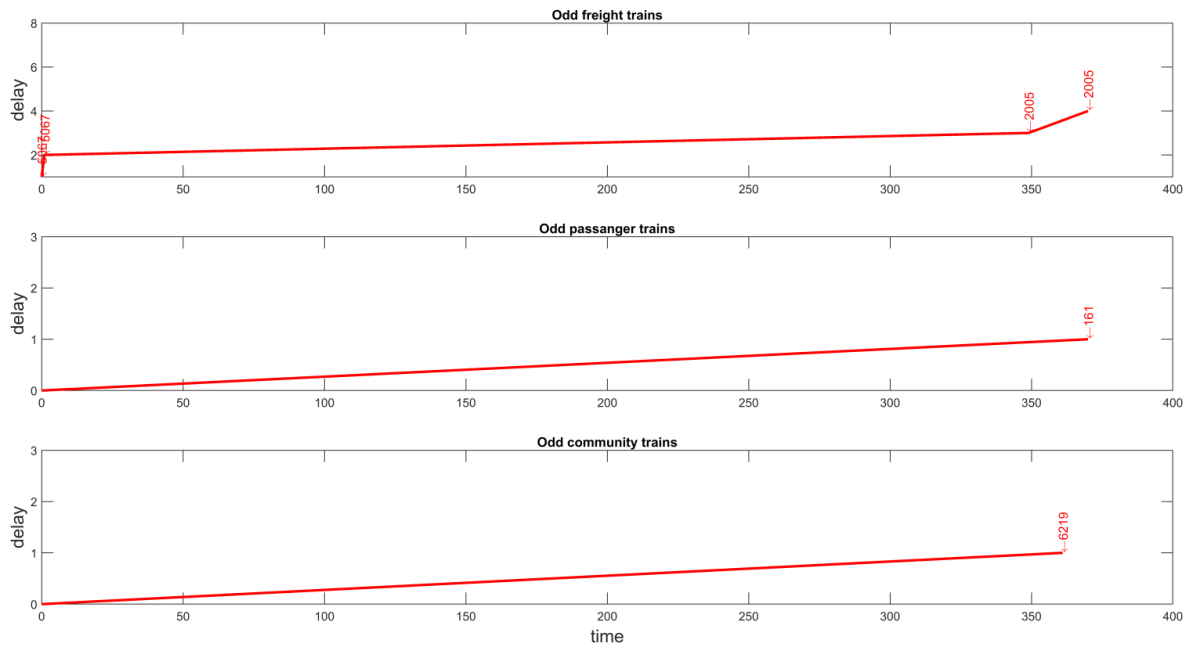


Рисунок 2.3 – Залежність кількості затриманих поїздів різних класів з наростаючим підсумком від моменту модельної затримки пасажирського поїзда №161 у непарному напрямку руху на дільниці Л – С

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

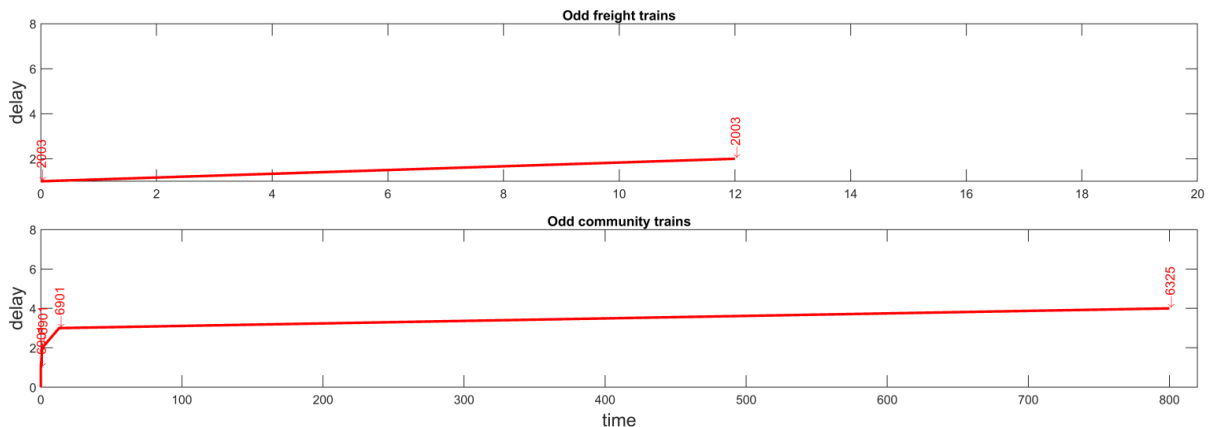


Рисунок 2.4 – Залежність кількості затриманих поїздів різних класів з наростаючим підсумком від моменту виникнення модельної затримки приміського поїзда №161 у непарному напрямку руху

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

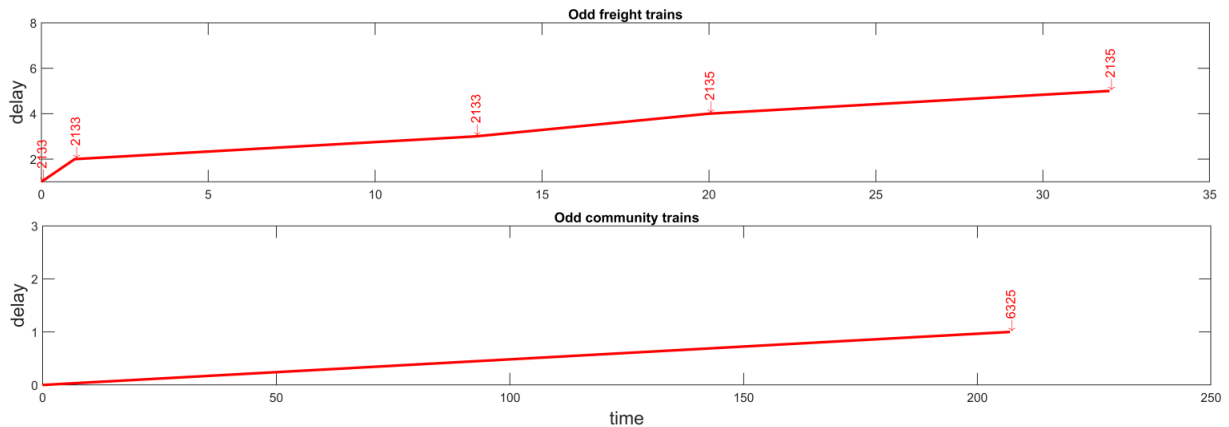


Рисунок 2.5 – Залежність кількості затриманих поїздів різних класів з наростаючим підсумком від моменту виникнення модельної затримки вантажних поїзда №161 у непарному напрямку руху.

Отримані дані були представлені у вигляді набору векторів $\langle \bar{X}_q, \bar{y}_q \rangle$ з перетворення часу з хвилин у години. Дані були використанні при пошуку параметрів швидкості розповсюдження затримки в системі диференціальних рівнянь за допомогою розв'язку оптимізаційної моделі (2.2) методом GA в середовищі Matlab, Додаток Б [114]. Візуалізація динаміки зміни значень фітнес функції GA наведена на рис. 2.6.

За результатом розв'язку оптимізаційної моделі (2.2) були знайдені наступні коефіцієнти $\beta^{1,1} = 0.0004$; $\beta^{1,2} = 0.0011$; $\beta^{1,3} = 0.0001$; $\beta^{2,1} = 0.0012$; $\beta^{2,2} = 0.1784$; $\beta^{2,3} = 0.0015$; $\beta^{3,1} = 0.0001$; $\beta^{3,2} = 0.0001$; $\beta^{3,3} = 0.0023$. Величина коефіцієнтів характеризує вплив одних категорій поїздів на інших,

що дозволяє чисельно оцінити взаємовплив поїздів різної пріоритетності у графіку руху поїздів.

Величина коефіцієнтів характеризує вплив одних категорій поїздів на інших, що дозволяє чисельно оцінити взаємовплив поїздів різної пріоритетності у графіку руху поїздів.

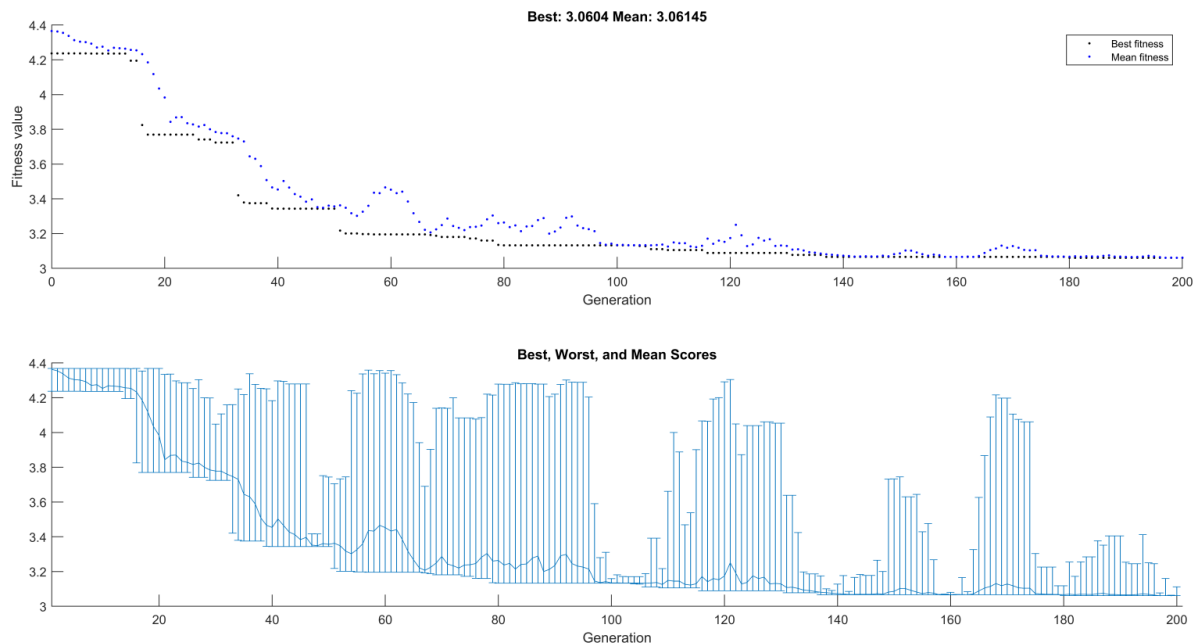


Рисунок 2.6 – Графік залежності кращих і середніх значень цільової функції F від кількості ітерацій GA в процесі підбору коефіцієнтів швидкості поширення затримки

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

Для практичної реалізації запропонованої математичної моделі у даному розділі дисертації був розроблений програмний код в середовищі середовищі Matlab. Програмна реалізація математичної моделі SIR з машинним навчанням наведено у Додатку Б.

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

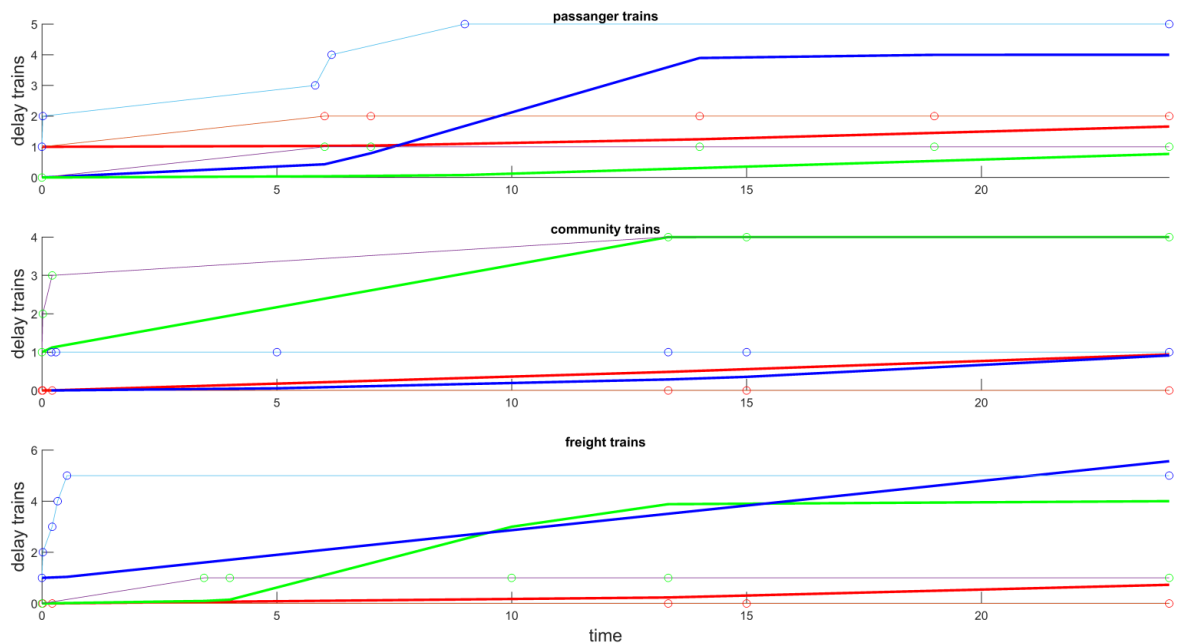


Рисунок 2.7 – Порівняльний графік динаміки кількості затриманих поїздів між емпіричними значеннями I^r та модельними I_m^r за трьома сценаріями затримки відповідно до $\langle \bar{X}_q, \bar{Y}_q \rangle$ на розрахунковій ділянці: тонка лінія з колами – емпіричні значення I^r ; жирна лінія – модельні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

Для дослідження впливу величини резерву часу на надійність графіку руху поїздів були проведені експериментальні результати моделювання відновлення руху поїздів на ділянці, що досліджується. Запропоновано змінити початкові умови – затримати з 9 наявних 5 пасажирських поїздів, $I^{r=1}(t=0) = 5$ поїздів.

Виходячи з діючих нормативів використати наступні параметри швидкості відновлення затримки у поїздів класу r на дільниці: $\gamma^{r=1} = 0.05$; $\gamma^{r=2} = 0.0667$; $\gamma^{r=3} = 0.10$. Початкові умови при $t = 0$ для моделювання $N^{r=1} = 9$ поїздів, $N^{r=2} = 4$ поїздів, $N^{r=3} = 32$ поїздів. Коефіцієнти швидкості поширення затримки $\beta^{r,l} \in \{3 \times 3\}$ приймались відповідно до наведених значень розв'язку оптимізаційної задачі, що наведені вище за текстом даної дисертації. Діаграма розмаху між емпіричними та модельними значеннями наведено на рис. 2.8

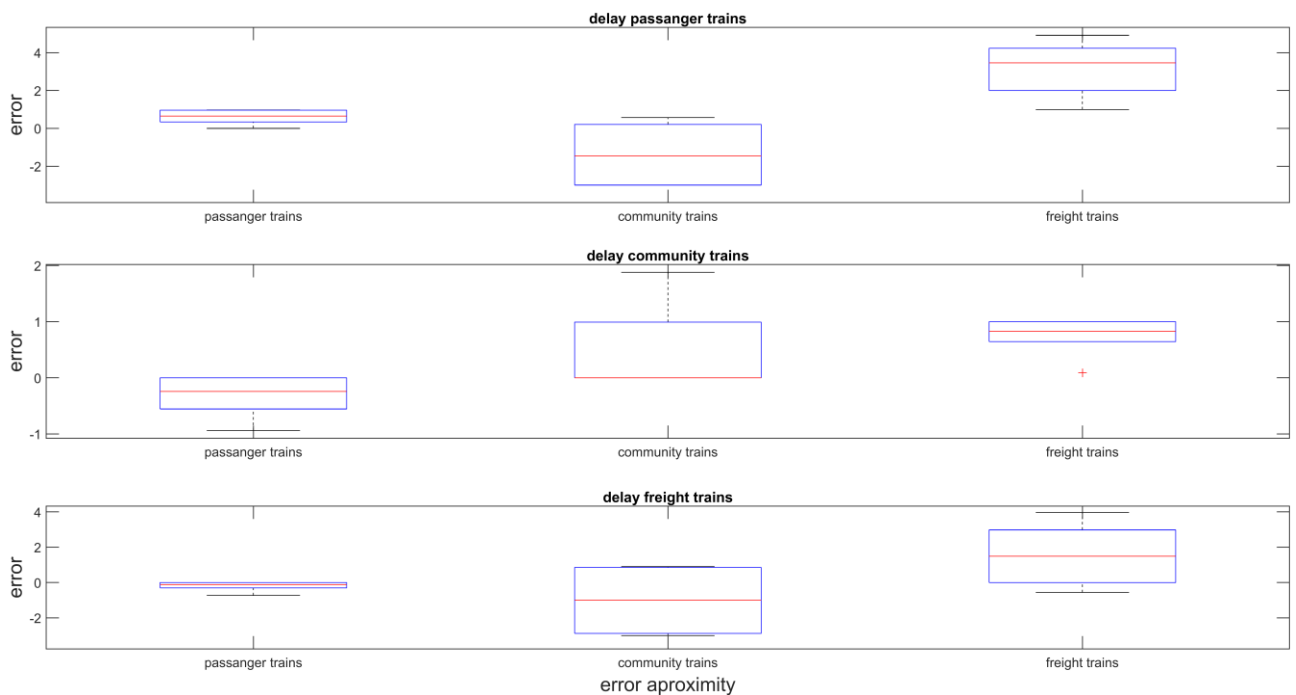


Рисунок 2.8 – Діаграма розмаху між емпіричними значеннями I^r та модельними I_m^r кількості затриманих поїздів за трьома сценаріями затримки відповідно до $\langle \bar{X}_q, \bar{y}_q \rangle$ на розрахунковій дільниці

Розв'язок розробленої системи рівнянь SIR моделі дозволив отримати результати відновлення руху поїздів при виникненні затримки п'яти пасажирських поїздів на лінії Л – С (рис. 2.9).

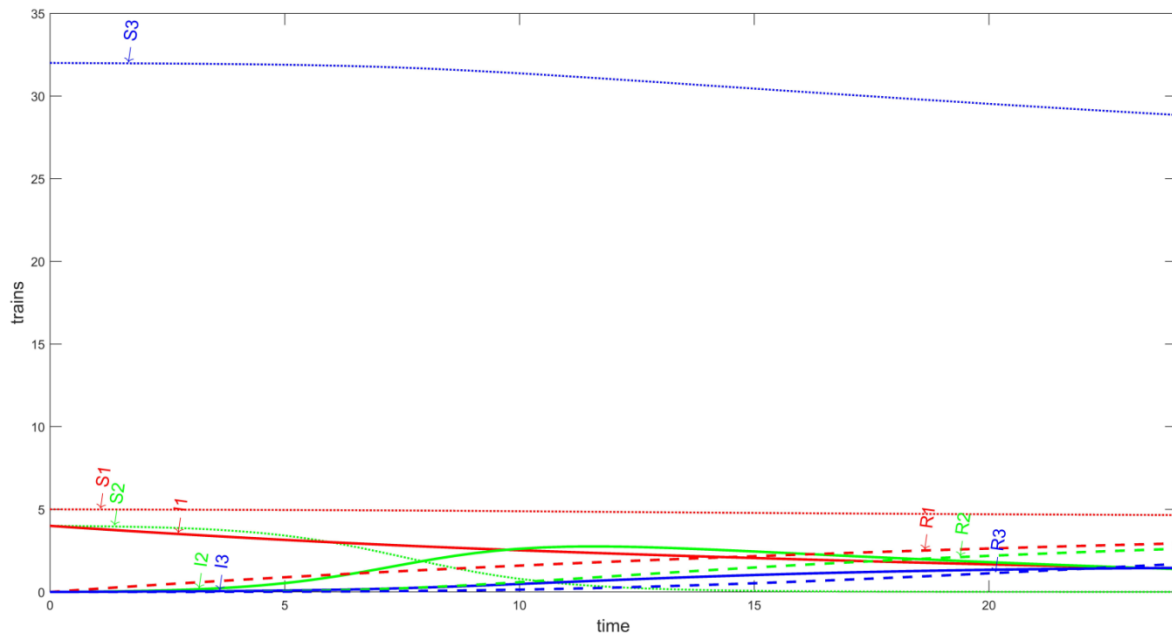


Рисунок 2.9 – Графік динаміки зміни станів потоків поїздів в умовах відновлення руху поїздів протягом доби ($t=24$ год) при виникненні затримки п'яти пасажирських поїздів на лінії Л – С: червоний колір – пасажирські поїзди $r=1$; зелений колір – приміські поїзди $r=2$; синій колір – вантажні поїзди $r=2$

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

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

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

За результатами моделювання вперше чисельно визначений вплив поїздів різних категорій та величини їх резерву часу на надійність графіка руху на лінії, що досліджувалась. З п'яти затриманих поїздів при закладеному компенсаційному часі відновлення 20 хвилин вдається відновити рух 47 % поїздів від загальної кількості затриманих. При цьому затримка п'яти пасажирських поїздів (вищий пріоритет руху), призвела до затримок інших поїздів. Закладений час відновлення для приміських і вантажних поїздів дозволив відновити рух відповідно 51 % та 83 % поїздів від загальної кількості затриманих.

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

Дискретні варіаційні ряди різниці величин між емпіричними I^r та модельними значеннями I_m^r кількості затриманих поїздів наведена у табл., 2.2.

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

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

Розрахунок параметрів наведено у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Таблиця для розрахунку показників

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

Для оцінки ряду розподілу знайдено такі показники:

- показники центру розподілу:

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

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

- показники варіації. Абсолютні показники варіації.

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

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

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

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

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

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

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

- незміщена оцінка дисперсії розраховано за виразом

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

-середнє квадратичне відхилення

$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{0,313} = 0,56$. Кожне значення ряду відрізняється від середнього значення -0,484 в середньому на 0,56.

- оцінка середньоквадратичного відхилення

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

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

$$\chi^2 = \sum \frac{(f_i - f_i^*)^2}{f_i^*}, \text{ де } f_i^* \text{ – теоретичні частоти: } f_i^* = \frac{N \cdot h}{\sigma} \phi_i.$$

Розрахунок теоретичних частот за умови наступних показників. $N = 6$, $h=0.78152507968303$ (ширина інтервалу), $\sigma = 0.56$, $x_{cp} = -0.484$. (табл. 2.4)

Таблиця 2.4 – Показники для розрахунку теоретичних частот

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

Розрахунок параметрів для знаходження спостережуваного значення критерію Пірсона наведено у табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Розрахунок параметрів для знаходження спостережуваного значення критерію Пірсона

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

Визначимо кордон критичної області. Так як статистика Пірсона вимірює різницю між емпіричним і теоретичним розподілами, то чим більше її бачимо значення χ^2 , тим сильніше аргумент проти основної гіпотези. Тому критична область для цієї статистики завжди правобічна: $[\chi_{кр}; +\infty)$. Її кордон $K_{кр} = \chi^2_{кр}(k-r-1; \alpha)$ знаходимо за таблицями розподілу χ^2 і заданим значенням σ , $k = 6$, $r = 2$ (параметри $x_{ср}$ і σ оцінені за вибіркою). $\chi_{кр}(0,05; 3) = 7.81473$; $\chi_{сн}^2 = 5,33$

Спостережуване значення статистики Пірсона не влучає у критичну область:

$\chi^2 < \chi_{кр}$, тому немає підстав відкидати основну гіпотезу. Справедливо припущення про те, що дані вибірки мають нормальний розподіл. Отже, кожне значення ряду відрізняється від середнього значення -0,484 в середньому на 0,56. Перевірка гіпотези за критерієм згоди Пірсона показала, що немає підстав відкидати гіпотезу про нормальний закон розподілу.

За аналогічною послідовністю проведено розрахунок для відхилень між емпіричними та модельними значеннями кількості затриманих приміських поїздів згідно наведених значень у таблиці 2.2. Розрахунок параметрів наведено у табл. 2.6. Відсортовано ряд по зростанню і підраховано кількість повторень для кожного елемента ряду.

Таблиця 2.6 – Таблиця для розрахунку показників

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

Для оцінки ряду розподілу знайдено такі показники:

- показники центру розподілу:

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

Знаходимо x_i , при якому накопичена частота S буде більше $\Sigma f / 2 = 4$. Це значення $x_i = 0,959595495$. Таким чином, медіана дорівнює $-0,959595495$. Медіана є хорошою характеристикою при асиметричному розподілі даних, тому що навіть при наявності "викидів" даних, медіана більш стійка до впливу відхилень даних.

- показники варіації. Абсолютні показники варіації.

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

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

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

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

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

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

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

- незміщена оцінка дисперсії розраховано за виразом

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

- середнє квадратичне відхилення

$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{0,486} = 0,697$. Кожне значення ряду відрізняється від середнього значення 0,385 в середньому на 0697.

- оцінка середньоквадратичного відхилення

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

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

$$\chi^2 = \sum \frac{(f_i - f_i^*)^2}{f_i^*}, \text{ де } f_i^* - \text{теоретичні частоти: } f_i^* = \frac{N \cdot h}{\sigma} \phi_i.$$

Розрахунок теоретичних частот за умови наступних показників. $N = 6$, $h=0,991363211$ (ширина інтервалу), $\sigma = 0.697$, $x_{cp} = 0,385$. (табл. 2.7)

Таблиця 2.7 – Показники для розрахунку теоретичних частот

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

Розрахунок параметрів для знаходження спостережуваного значення критерію Пірсона наведено у табл. 2.8.

Таблиця 2.8 – Розрахунок параметрів для знаходження спостережуваного значення критерію Пірсона

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

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

За аналогічною послідовністю проведено розрахунок для відхилень між емпіричними та модельними значеннями кількості затриманих вантажних поїздів згідно наведених значень у таблиці 2.2. Розрахунок параметрів наведено у табл. 2.9. Відсортовано ряд по зростанню і підраховано кількість повторень для кожного елемента ряду.

Таблиця 2.9 – Таблиця для розрахунку показників

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

Для оцінки ряду розподілу знайдено такі показники:

- показники центру розподілу:

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

Знаходимо x_i , при якому накопичена частота S буде більше $\Sigma f / 2 = 4$. Це значення $x_i = 2,976842806$. Таким чином, медіана дорівнює 2,976842806. Медіана є хорошою характеристикою при асиметричному розподілі даних, тому що навіть при наявності "викидів" даних, медіана більш стійка до впливу відхилень даних.

- показники варіації. Абсолютні показники варіації.

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

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

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

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

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

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

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

- незміщена оцінка дисперсії розрахована за виразом

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

- середнє квадратичне відхилення

$\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{2,452} = 1,566$. Кожне значення ряду відрізняється від середнього значення 1,58 в середньому на 1,566.

- оцінка середньоквадратичного відхилення

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

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

$$\chi^2 = \sum \frac{(f_i - f_i^*)^2}{f_i^*}, \text{ де } f_i^* - \text{теоретичні частоти: } f_i^* = \frac{N \cdot h}{\sigma} \phi_i.$$

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

Таблиця 2.10 – Показники для розрахунку теоретичних частот

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

Розрахунок параметрів для знаходження спостережуваного значення критерію Пірсона наведено у табл. 2.11.

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

Таблиця 2.11 – Розрахунок параметрів для знаходження спостережуваного значення критерію Пірсона

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

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

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

2.6. Висновки до розділу 2

1. На основі проведеного 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. Згідно з аналізом практичних сценаріїв використання резервів у вигляді компенсаційного часу в нитці графіка виявлено, що важливим є вирішення завдання пошуку раціональних величин компенсаційного часу в нитках графіку поїздів різних категорій. Це дозволить знайти баланс між надійністю графіка руху та практичною пропускнуою спроможністю залізничної дільниці.

2. Для вирішення завдання пошуку раціональних величин компенсаційного часу в нитках графіку поїздів різних категорій запропоновано формалізувати процес розповсюдження затримок поїздів на залізничній лінії з урахуванням взаємовпливу поїздів різних категорій та величини їх резерву часу. Запропоновано метод дослідження впливу величини резерву часу на надійність графіку руху поїздів на основі модифікованої епідеміологічної SIR-моделі. За спеціально розробленим алгоритмом здобуття даних отримані емпіричні дані щодо розповсюдження затримок поїздів на дільниці.

3. За результатами моделювання вперше чисельно визначений вплив поїздів різних категорій та величини їх резерву часу на надійність графіка руху на лінії, що досліджувалась. З п'яти затриманих поїздів при закладеному компенсаційному часі відновлення вдається відновити рух 47 % поїздів від загальної кількості затриманих. При цьому затримка п'яти пасажирських поїздів (вищий пріоритет руху), призвела до затримок інших поїздів.

Закладений час відновлення для приміських і ватажних поїздів дозволив відновити рух відповідно 51 % та 83 % поїздів від загальної кількості затриманих.

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

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДУ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАТРИМОК
ПОЇЗДІВ В ЗАЛІЗНИЧНИХ МЕРЕЖАХ ЗА ДОПОМОГОЮ
ЕПІДІОЛОГІЧНИХ SIR-МОДЕЛЕЙ

3.1. 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 $G(P,E)$ [6, 115]. 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 ділянки з однаковими експлуатаційними умовами руху, $i,j \in P$, де $i = \overline{1,n}$, $j = \overline{1,n}$; E – множина ребр e_{ij} , що з'єднують відповідні вершини графа та відповідають залізничним ділянкам між станціями мережі, де $e_{ij} \in E$, $i, j = \overline{1,n}$ (рис. 3.1).

Враховуючи специфіку технологічних операцій та пріоритетності руху важливо врахувати різні типи потоків поїздів: пасажирський, приміський та вантажний рух. Отже, позначимо через r – тип поїздопотоку, $r=1, 2, 3$. 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 ділянці e_{ij} , що відповідає числу поїздів, які прямують із s у t , $f_{ij}^{st} > 0$. Для спрощення представлення занумеруємо кожен маршрут $\langle s, t \rangle$ параметром μ . Кожен маршрут поїздопотоку r із пункту відправлення s до пункту прибуття t можна 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 ділянку e_{ij} .

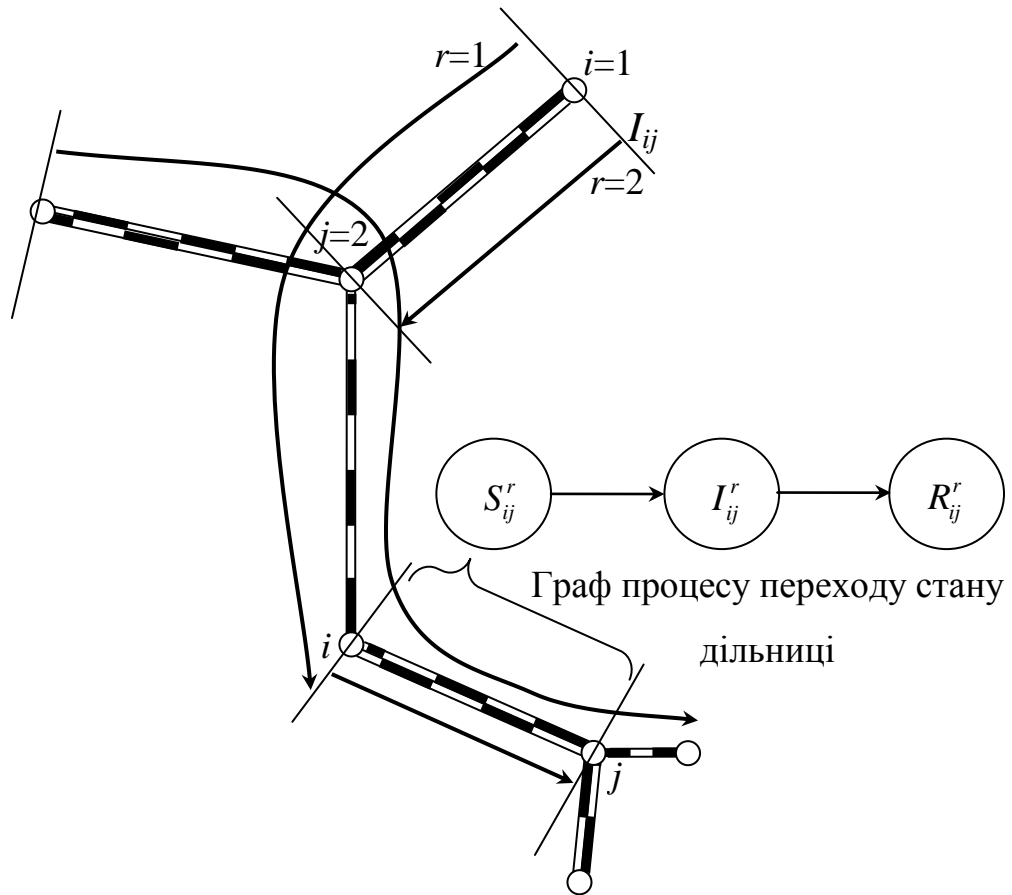


Рисунок 3.1 – Граф мережі $G(P, E)$, потоки поїздів та представлення процесу переходу стану ділянки відповідно до моделі SIR

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

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

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 [33,98].

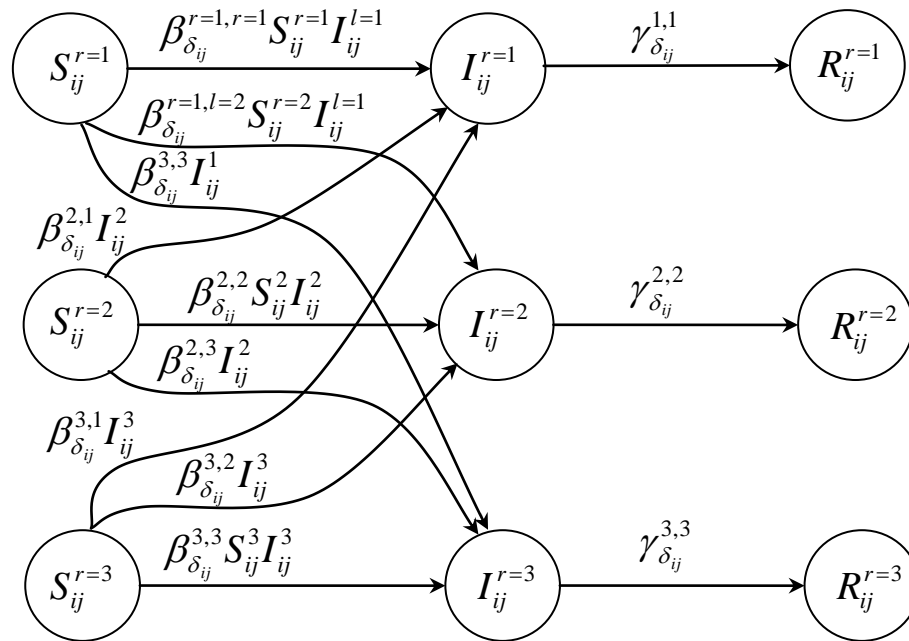
3.1.1. Епідеміологічна математична модель розповсюдження затримок поїздів на графі залізничної мережі

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 [116, 117]. З класичних математичних моделей епідеміології в даній роботі запропоновано застосувати SIR-модель (англ., “Susceptible-Infected-Removed model”), яка описує епідею з одужанням. Адаптуючи дану модель до задачі моделювання динаміки поширення затримки в залізничній мережі, можна представити процес розповсюдження інфекційних хвороб через зараження як 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., Removed). Отже, сприятливі це $S(t)$ – чутливі до затримки поїзди, які в момент часу t слідує за графіком руху. Інфіковані це $I(t)$ – поїзди, що слідує 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), слідує за графіком, або прибули на кінцеву станцію та не впливають на виникнення затримок в подальшому русі (рис. 3.2). 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 [102] 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 з причин їх пріоритетності та важливості дотримання нормативного розкладу руху поїздів. Після пасажирських поїздів нижчий пріоритет мають вантажні поїздопотоки, які слідує 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 [119]. 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 .



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

Згідно графа переходів, що характеризує стани дільниці, у графі G на рис. 3.1 швидкість зміни кількості сприятливих до затримки поїздів на дільниці ij можна визначити як

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

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

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

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} .

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

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

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 – 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 дозволило 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 слідує як транзитні через вершину j , визначати за коефіцієнтом транзитності. Коефіцієнт транзитності визначається за виразом

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

де $I_{jk,transf}^r$ – кількість затриманих поїздів класу r , що є транзитними для вершини j та слідує на дільницю jk , $j=k$, поїздів; ΣN_{ik}^r – загальний потік поїздів класу r , що прослідуює вершину j в напрямі вершини k ; k – номер вершини, що передуює 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 (3.1)–(3.3) 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 (3.1)–(3.3). Метод пошуку коефіцієнтів швидкості розповсюдження затримки математичної моделі та розв'язок системи диференційних рівнянь в межах фітнес функції наведено у підрозділі 2.3 даної дисертації.

Для послідовного розв'язку $SIR_{\delta_{ij}}$ -моделей, що відповідають кожному ребру графа, розроблено алгоритм [120], який перетворює граф мережі на спрямоване дерево, коренем якого є станція виникнення затримки (Додаток В). Згідно до вибудованої послідовності розв'язується $SIR_{\delta_{ij}}$ модель відповідної дільниці, що визначає параметри поширення затримки на графі. Для послідовного розв'язку $SIR_{\delta_{ij}}$ -моделей, що відповідають кожному ребру графа, розроблено алгоритм [120], який перетворює граф мережі на спрямоване дерево, коренем якого є станція виникнення затримки. Згідно до вибудованої послідовності розв'язується $SIR_{\delta_{ij}}$ модель відповідної дільниці, що визначає параметри поширення затримки на графі.

3.2. Результати моделювання розповсюдження затримок поїздів на графі залізничного полігону

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

Граф залізничного полігону із заданими потоками поїздів різних класів r представлено на рисунку 3.3.

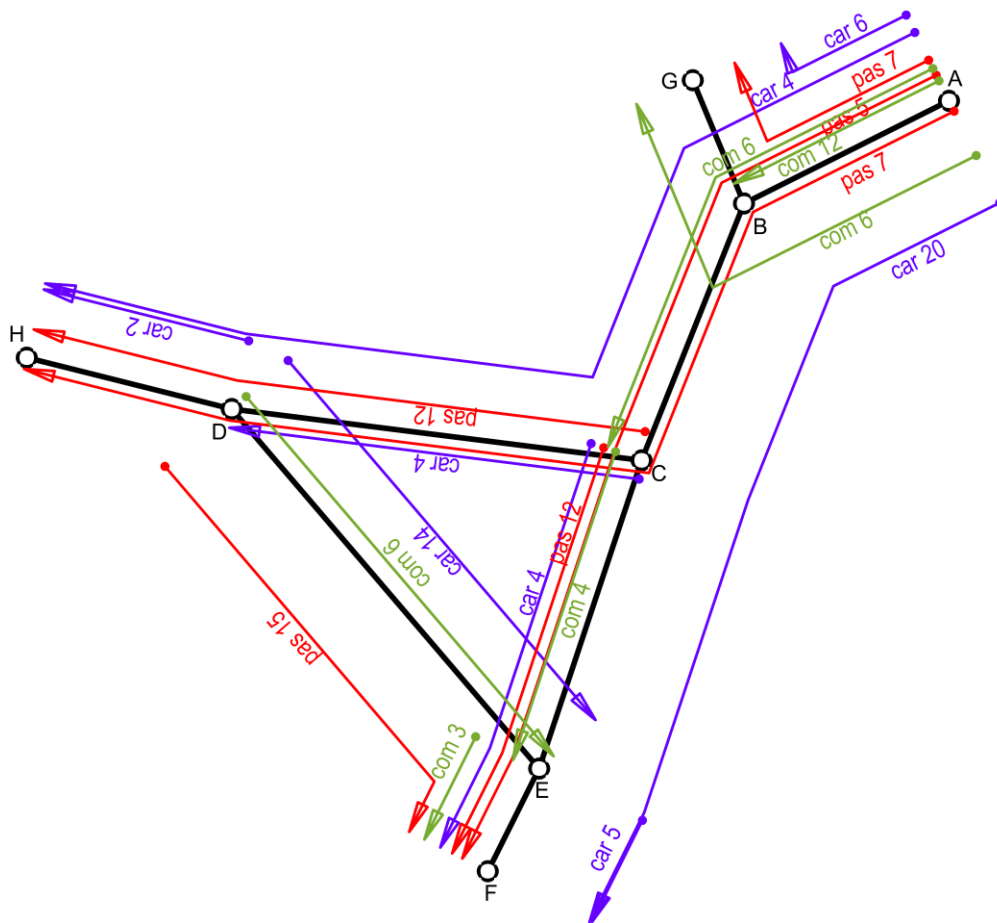
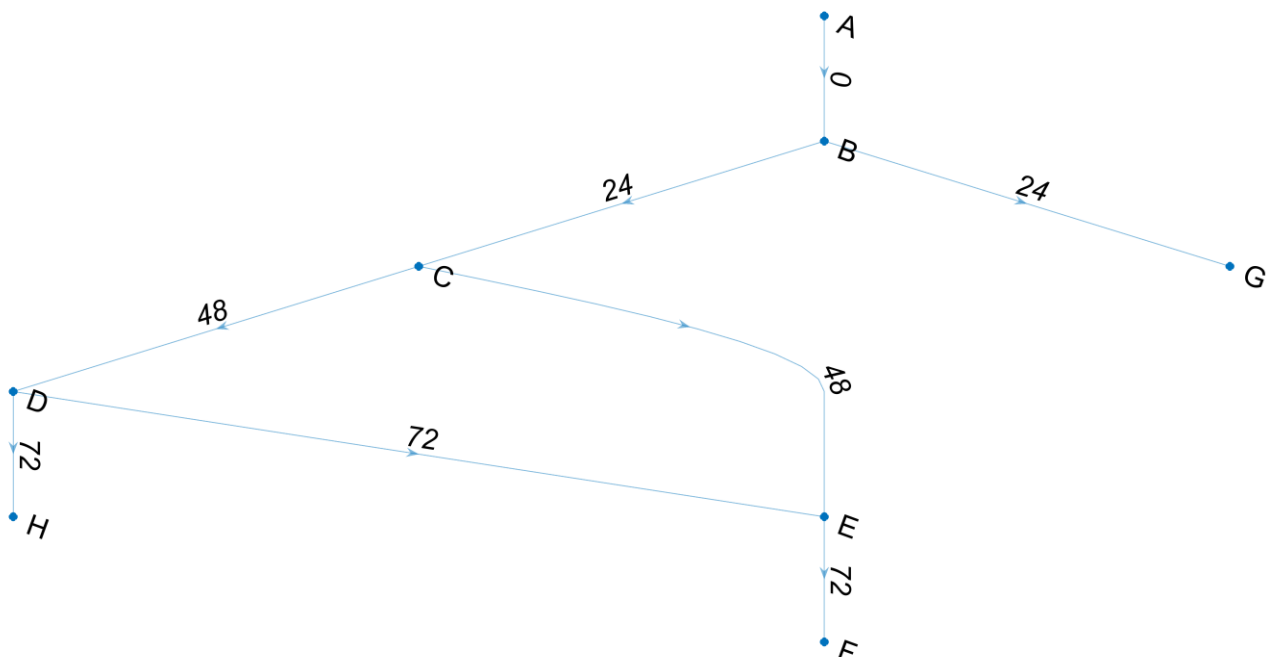


Рисунок 3.3 – Граф залізничного полігону з візуалізацією потоків поїздів різних класів

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. Програмна реалізація математичної моделі розповсюдження затримок на графі залізничної мережі наведено у Додатку В.

На рисунку 3.4 наведено перетворений граф полігону у спрямоване дерево.



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

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: $\gamma^{r=1} = 0.05 \text{ год}^{-1}$; $\gamma^{r=2} = 0.0667 \text{ год}^{-1}$; $\gamma^{r=3} = 0.10 \text{ год}^{-1}$.

Коефіцієнти швидкості поширення затримки $\beta_{\delta_{ij}}^{r,l} \in \{3 \times 3\}$ приймалися відповідно до значень розв'язку оптимізаційної задачі настроювання відповідних $SIR_{\delta_{ij}}$ -моделей (див. підрозділ 2.3.1). Початкові умови та значення станів поїздів різних класів r на дільницях залізничного полігону, що досліджується наведені у таблиці 3.1.

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

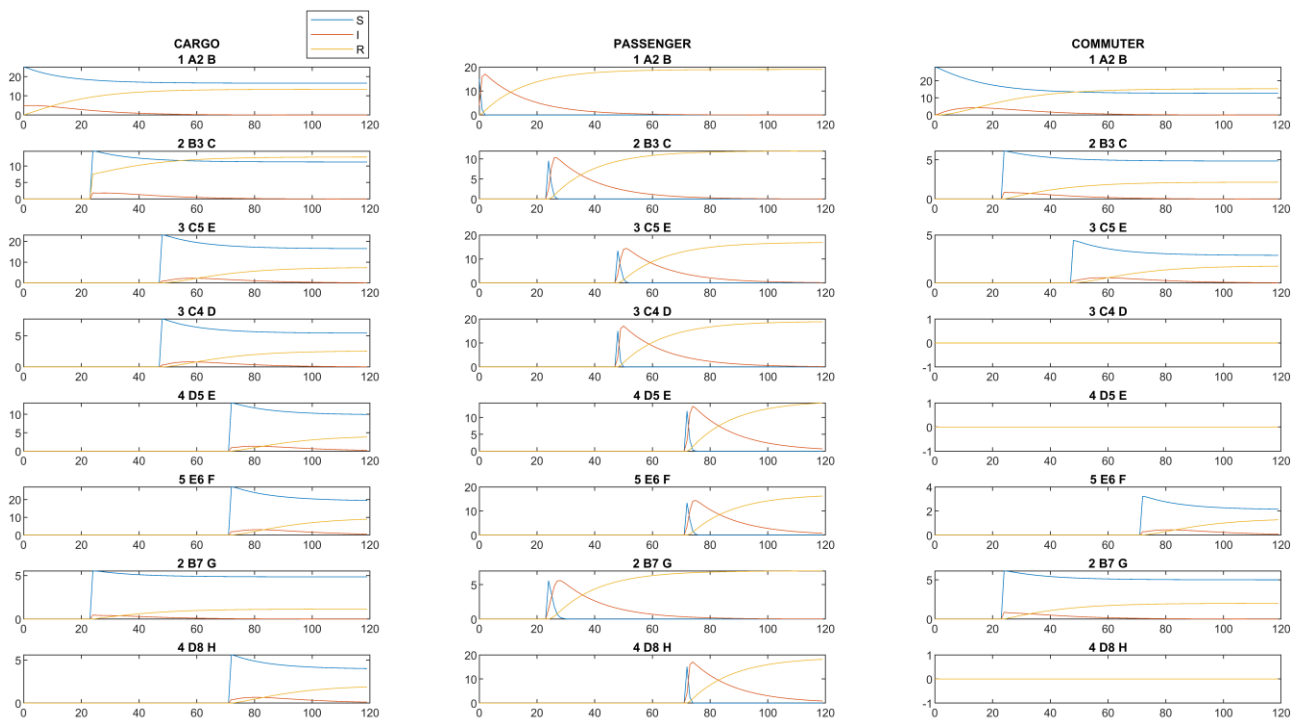


Рисунок 3.5 – Графіки динаміки зміни станів потоків поїздів в умовах відновлення руху поїздів на дільницях залізничного полігону при виникненні затримок за відправленням на станції А: жовтий колір – поїзди, що чутливі до затримки; синій колір – затримані поїзди; помаранчевий колір – поїзди, що відновили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

За результатами моделювання вперше чисельно визначений вплив “мережевого ефекту” на надійність руху поїздопотоків на розгалуженому залізничному полігоні. З чотирьох затриманих пасажирських поїздів при закладеному компенсаційному часі відновлення $0,05 \text{ год}^{-1}$ вдається послідовно на лінії А-В-С-Е-Ф відновити рух відповідно від двох до трьох пасажирських поїздів, але на виході полігону по станції F все ж затримка залишаєть у двох поїздів.

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

дільниця	Пасажирськ і поїзди, $\gamma=1$	Приміські поїзди, $\gamma=2$	Вантажні поїзди, $\gamma=3$	Пасажирськ і поїзди, $\gamma=1$	Приміські поїзди, $\gamma=2$	Вантажні поїзди, $\gamma=3$	Пасажирськ і поїзди, $\gamma=1$	Приміські поїзди, $\gamma=2$	Вантажні поїзди, $\gamma=3$	Модельний час	Ознака вектора для
	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-Ф	27,08	13,35	3,22	1,92	3,65	0,28	0,00	0,00	0,00	72	вхід
Е-Ф	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

Компенсаційний час резерву, що закладений на лінії А-В-С-Е-Ф дозволяє із п'яти затриманих вантажних поїздів по станції А відновити рух до станції F –

затримано лише один вантажний поїзд (табл.3.1). Однак, закладений час відновлення для поїздів на ділянці E-F не дозволяє відновити рух з причини затримок поїздів переданих з попередньої ділянки D-E. Це вимагає перегляду резервів часу у бік збільшення для ділянки E-F, або суміжної з нею D-E для можливості поглинання первинної затримки на залізничному полігоні.

Результати моделювання дозволили оцінити вплив затримки на стабільність руху поїздопотоку при відхиленні від основної лінії A-B-C-E-F по станції С. На відхиленні лінії C-D-H первинна затримка призвела до виходу з полігону по станції Н одного затриманого пасажирського та чотирьох приміських поїздів. На ділянці A-B 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 ділянках полігону в умовах затримок пасажирських поїздів, що мають вищий пріоритет. Отримані результати моделювання підтвердили адекватність розв'язків на основі порівняння реальних умов роботи ділянок 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 перегляну 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 CPUv 1,60GHz 1.80 GHz з ОЗУ 4 ГБ. Для порівняння у дослідженні [63], де застосовано оптимізаційну математичну модель, що будує детальний графік руху поїздів, розрахунок тільки для однієї ділянки триває до 7 хвилин. За ручним способом побудови графіків руху, що є найбільш точним методом, перевірка на затримку тільки на одній ділянці може потребувати декілька робочих днів.

Отримані результати моделювання розповсюдження затримок поїздів на розгалуженому залізничному полігоні свідчать про те, що запропонований метод моделювання на основі модифікованих епідеміологічних моделей є досить точним – похибка між емпіричними та модельними результатами складає до 10 %, в умовах швидких розрахунків [1,6,1210]. Крім того, на відміну від відомих підходів до моделювання планового руху поїздів [95,96] та мікромоделювання [63], 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. 3.1).

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” [89]. 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.

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

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

Під надійністю в даному дослідженні, згідно [121,122,123], розуміється властивість системи – залізничної дільниці з технологічним процесом перевезень встановленим графіком руху поїздів зберігати протягом заданого інтервалу часу (доба) в установлених межах значення точності виконання ГРП, які характеризують здатність виконувати основну функцію – пропуск поїздопотоків через дільницю. Під деталізуючою властивістю надійності розглядається безвідмовність. Під відмовою слід розуміти затримку поїзда по прибуттю або відправленню на кожній із станцій на дільниці. Показником оцінки експлуатаційної надійності роботи дільниці є коефіцієнт готовності

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

де N – кількість поїздів на дільниці. I^r – кількість затриманих поїздів категорії r на дільниці. Так як пропускна спроможність на дільниці визначається за добовий період, то і коефіцієнт готовності необхідно визначати в розрахунку на добу.

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

Для рекомендації більш зваженого рішення в даному дослідженні запропоновано виконувати вибір за наступними критеріями (рис. 3.6) [125]: - за критерієм Вальда; - за критерієм Севіджа; - за критерієм Гурвіца; - за критерієм Байєса.

результати моделювання

дільниця	І	А-В	В-С	С-Е	С-Д	Д-Е	Е-Г	Г-Н
І	1	2	3	4	5	6	7	8
А-В	18,22	0,00	16,42	2,34	3,96	3,50	9,45	15,04
В-С	14,57	9,50	6,12	1,87	2,50	0,88	0,00	0,00
С-Е	11,92	0,00	5,11	0,93	2,55	0,37	11,13	9,45
С-Д	23,07	15,39	4,42	0,93	3,81	0,25	0,00	0,00
Д-Е	17,79	0,00	3,18	1,59	3,65	0,37	4,42	13,55
Е-Г	7,69	14,96	0,00	0,31	4,04	0,00	0,00	0,00
Г-Н	5,83	0,00	0,00	0,54	3,95	0,00	1,63	15,05
І	10,44	0,00	0,00	0,82	3,15	0,00	2,74	11,85
А-В	21,08	13,35	3,22	1,92	3,65	0,28	0,00	0,00
В-С	20,75	0,00	2,32	1,98	3,65	0,28	6,27	13,55
С-Е	5,33	5,54	6,12	0,47	1,46	0,88	0,00	0,00
С-Д	4,99	0,00	5,24	0,20	1,55	0,34	0,80	3,45
Д-Е	5,80	15,05	0,00	0,40	3,95	0,00	0,00	0,00
Е-Г	4,23	0,00	0,00	0,41	3,98	0,00	1,35	15,04

статистична гра

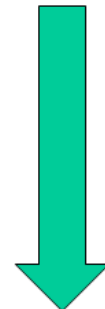
A _i	A-B	B-C	C-E	C-D	D-E	E-F	B-G	D-H
стратегія А ₁	0,9	0,886898	0,879329	0,834562	0,862677	0,880751	0,891598	0,82534
стратегія А ₂	0,75	0,88965	0,8756	0,8347	0,85634	0,84652	0,605489	0,76492
стратегія А ₃	0,95	0,86777	0,8793	0,834562	0,862677	0,880751	0,891598	0,82534

Показником оцінки експлуатаційної надійності роботи дільниці є коефіцієнт готовності

$$\alpha_{експл.ij} = \frac{N}{N + \sum I^r}$$

← загальна кількість поїздів у ГРП на дільниці

← загальна кількість затриманих поїздів на дільниці



- Вибір стратегії:
- за критерієм Вальда;
 - за критерієм Севіджа;
 - за критерієм Гурвіца;
 - за критерієм Байєса.

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

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

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

A _i	П _ж =1 (A-B)	П _ж =2 (B-C)	П _ж =3 (C-E)	П _ж =4 (C-D)	П _ж =5 (D-E)	П _ж =6 (E-F)	П _ж =7 (B-G)	П _ж =8 (D-H)
стратегія А ₁	0,900	0,887	0,879	0,835	0,863	0,881	0,892	0,825
стратегія А ₂	0,750	0,890	0,876	0,835	0,856	0,847	0,605	0,765
стратегія А ₃	0,950	0,868	0,879	0,835	0,863	0,881	0,892	0,825

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

Таблиця 3.3 - Матриця для розрахунку за критерієм Вальда

A _i	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	min(a _{ij})
A1	0,900	0,887	0,879	0,835	0,863	0,881	0,892	0,825	0,825
A2	0,750	0,890	0,876	0,835	0,856	0,847	0,605	0,765	0,605
A3	0,950	0,868	0,879	0,835	0,863	0,881	0,892	0,825	0,825

Вибираємо з (0.82534; 0.605489; 0.82534) максимальний елемент $\max=0.82534$. Отже, за критерієм Вальда приймається стратегія A1.

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

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

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

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

Вибираємо з (0.90495015; 0.83501847; 0.90895974) максимальний елемент $\max=0.91$. Отже, за критерієм Байєса приймається стратегія A3.

Таблиця 3.4 – Матриця для розрахунку за критерієм Байеса

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

Критерій мінімального ризику Севіджа рекомендує вибрати в якості оптимальної стратегії ту, при якій величина максимального ризику мінімізується в найгірших умовах, тобто забезпечується $a = \min(\max r_{ij})$ [124].

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

1. Розраховуємо перший стовпчик матриці ризиків.

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

2. Розраховуємо другий стовпчик матриці ризиків.

$$r_{12} = 0.88965 - 0.886898 = 0.0027520000000001; r_{22} = 0.88965 - 0.88965 = 0;$$

$$r_{32} = 0.88965 - 0.86777 = 0.02188;$$

3. Розраховуємо третій стовпчик матриці ризиків.

$$r_{13} = 0.879329 - 0.879329 = 0; r_{23} = 0.879329 - 0.8756 = 0.003729;$$

$$r_{33} = 0.879329 - 0.8793 = 2.90000000000057E-5;$$

4. Розраховуємо четвертий стовпчик матриці ризиків.

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

$$r_{34} = 0.8347 - 0.834562 = 0.000137999999999997;$$

5. Розраховуємо п'ятий стовпчик матриці ризиків.

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

$$r_{35} = 0.862677 - 0.862677 = 0;$$

6. Розраховуємо шостий стовпчик матриці ризиків.

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

$$r_{36} = 0.880751 - 0.880751 = 0;$$

7. Розраховуємо сьомий стовпчик матриці ризиків.

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

$$r_{37} = 0.891598 - 0.891598 = 0;$$

8. Розраховуємо восьмий стовпчик матриці ризиків.

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

$$r_{38} = 0.82534 - 0.82534 = 0.$$

Таблиця 3.5 - Матриця для розрахунку за критерієм Севіджа

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

Результати розрахунків наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати розрахунків за критерієм Севіджа

Ai	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	max(aij)
A1	0,05000	0,00275	0	0,00014	0	0,00000	0,00000	0,00000	0,05000
A2	0,20000	0	0,00373	0,00000	0,00634	0,03423	0,28611	0,06042	0,28611
A3	0,00000	0,02188	0,00003	0,00014	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,02188

Вибираємо з (0.05; 0.286109; 0.02188) мінімальний елемент $\min = 0,02188$.

Отже, за критерієм Севіджа приймається стратегія А3.

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

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

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

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

Розраховуємо s_i .

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

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

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

Таблиця 3.7 - Результати розрахунків за критерієм Гурвіца

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

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

Таким чином, в результаті рішення статистичної гри за різними критеріями частіше за інших вибрана стратегія А3, а отже резерви у нитках графіка за кожною ділянкою залізничного полігону рекомендовані для застосування у нормативному ГРП.

3.4. Висновки до розділу 3

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 ділянцям 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 ділянках полігону, що досліджувався. Отримані кількісні результати дозволили виявити недоліки у встановленні величин резервів часу на ділянці 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.

3. 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 критеріями вибору – Вальда, Байеса, Севіджа, Гурвіца. Це дозволяє вибирати зважений варіант закладення резервів у нормативному ГРП.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ВИМОГ ДО ФОРМУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ
ПІДСИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЗЕРВІВ ЧАСУ В
НИТКАХ ГРАФІКА ТА ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ4.1. Дослідження функцій діючих автоматизованих систем
АТ “Укрзалізниця” для розробки вимог до формування
автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу в
графіку руху поїздів

Процес складання графіка руху поїздів в АТ “Укрзалізниця” вимагає ув’язки багатьох технологічних етапів підготовки вхідних даних та узгодження розроблених ниток графіка між причетними підрозділами, відправниками і одержувачами вантажів, тощо. В процесі складання ГРП задіяно багато рівнів управління, що вимагає об’єднання прийнятих рішень щодо розробок ниток графіка руху в єдиному інформаційному середовищі. Для формування вимог до формування автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу в графіку руху поїздів важливо провести аналіз функцій діючих автоматизованих систем АТ “Укрзалізниця” та їх можливості взаємодії між собою.

Згідно до [33] в АТ “Укрзалізниця” діє система централізованого складання графіка руху поїздів (СЦСГРП), до якої входять департаменти, ГІОЦ Укрзалізниці, Головний та регіональні центри управління перевезеннями, регіональні філії та їх підрозділи, науково-дослідні й учбові інститути та інші організації залізничного транспорту, що приймають участь у підготовці даних та розробці графіка руху поїздів. Станом на 2020 рік ядром СЦСГРП є програмний продукт “АРМ Інженера-графіста”, що складається з комплексу програм автоматизованої розробки графіка руху поїздів (КПАР ГРП), які дозволяють розв’язувати такі завдання:

- вести аналіз і коректування вхідної інформації до розробки графіка руху поїздів;

- здійснювати розробку і коректування графіка у режимі пониткового прокладання;
- формувати, коректувати і креслити аркуші графіків встановленої форми, диспетчерські аркуші, кальки;
- розраховувати показники графіка;
- формувати і друкувати вихідні документи та розраховувати показники по довільних ділянках.

Програма “АРМ Інженера-графіста” (рис. 4.1) була розроблена у 1999 році, та не має функцій, що необхідні для ефективного складання ГРП, зокрема автоматичної побудови нитки графіка, розрахунку резервів часу у нитках графіка на мережі, моделювання затримок, відсутнім є зв’язок з АСК ВП УЗ та АСК ПП УЗ [126], тощо.

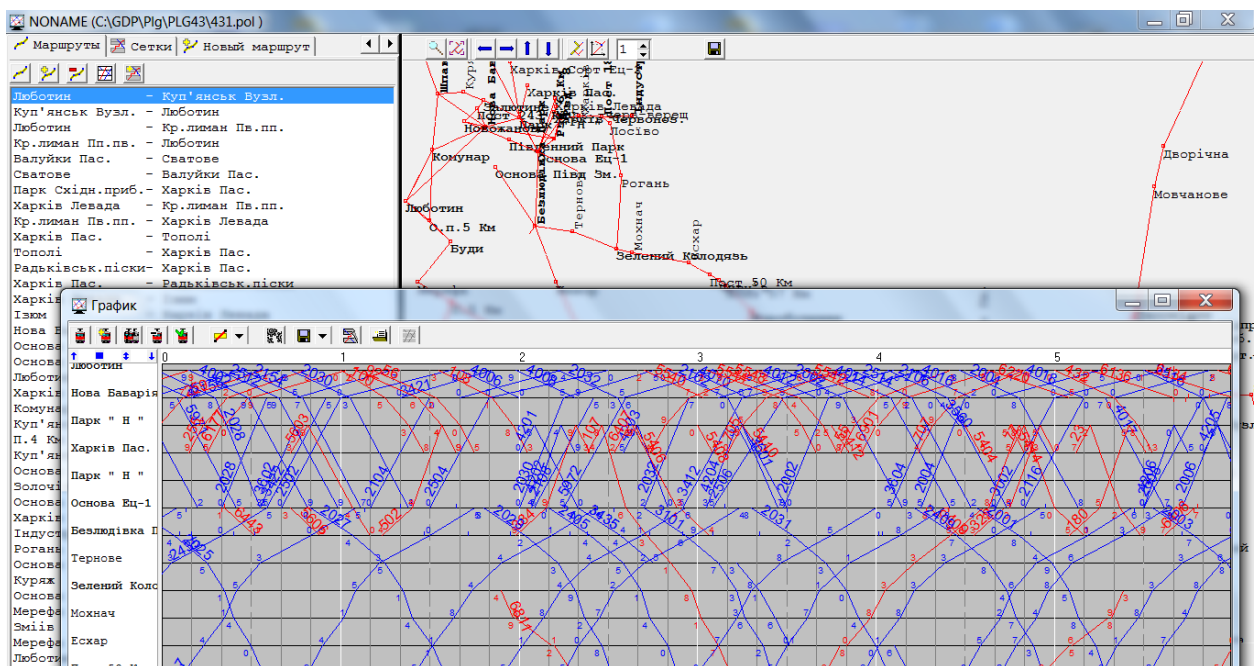


Рисунок 4.1 – Інтерфейс АРМ інженера-графіста

В межах складання ГРП [33], зокрема розробки нитки графіка, важливим етапом є встання перегінного час ходу, розгону і сповільнення поїздів різних категорій. Це виконується тяговими розрахунками згідно з діючими

“Правилами виконання тягових розрахунків для поїзної роботи ” [127], виходячи з норми ваги (уніфікованої або паралельної) та з урахуванням усієї сукупності постійних та тривалодіючих попереджень про обмеження швидкості на перегонах і станціях. Для проведення тягово-енергетичних розрахунків та визначення перегінних часів ходу поїздів, міжпоїзних і міжстанційних інтервалів руху в АТ “Укрзалізниця” діє програмний продукт ПК „Динамік”. Сам ПК „Динамік” інтегрований в межах програмного комплексу „Графоаналітичний редактор схем залізниць (ПП ГАС Railway)”, який призначений для побудови графоаналітичних схем залізниць та має інформаційну базу даних технічних параметрів залізничної мережі з одночасною побудовою графічної схеми мережі.

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

В межах оперативного управління перевезеннями в АТ “Укрзалізниця” функціонує Єдина Автоматизована система керування вантажними перевезеннями (АСК ВП УЗ-Є), що поєднує множину моделей перевізного процесу та забезпечує єдність інформаційного середовища. Система АСК ВП УЗ-Є складається з поїзної, вагонної, контейнерної, локомотивної моделі. В межах єдиного середовища функціонують різні автоматизовані системи та

підсистеми, які використовують спільне сховище даних. Це означає, що інформація про будь-які події в процесі перевезень постійно накопичується, утворюючи динамічні моделі процесу перевезень і відображуючи його історію. Система АСК ВП УЗ-Є має відкриту архітектуру (рис. 4.2). Завдяки цьому можуть бути додані будь-які нові інформаційні підсистеми.

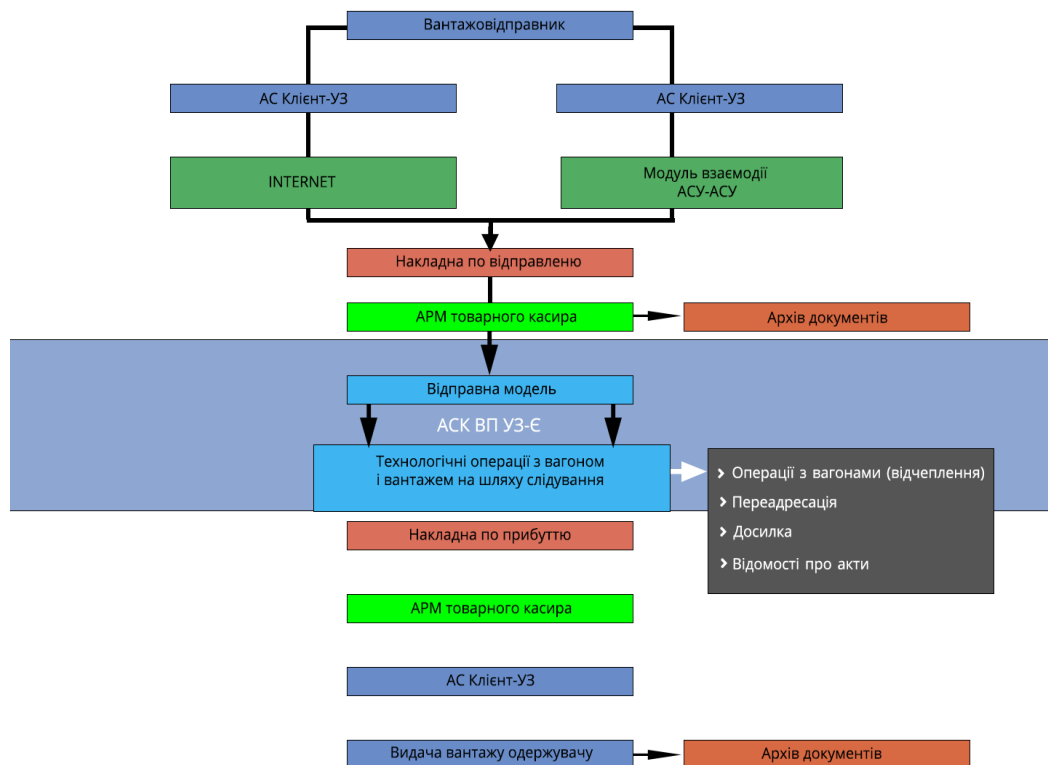


Рисунок 4.2 – Архітектура автоматизованої системи АСК ВП УЗ-Є

Враховуючи, що при складанні ГРП важливим етапом є замовлення та узгодження ниток графіка між відправником вантажу та АТ Укрзалізниця, можна розглядати як цифрову платформу взаємодії вже діючу автоматизовану систему АС МЕСПЛАН. Система розроблена для автоматизації процесу введення замовлень на перевезення і подальшого формування планів згідно з «Правилами планування перевезень вантажів» [7,137]. Для забезпечення взаємодії з вантажовласниками у процесі роботи з АС МЕСПЛАН, оформлення,

обробки електронних перевізних документів діє автоматизована система АС

Клієнт УЗ. Функції АС Клієнт УЗ:

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

- забезпечення взаємодії автоматизованих систем УЗ з автоматизованими системами відправників та одержувачів вантажів у процесі формування та обробки перевізних документів [129].

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

4.2. Дослідження процедур планування та розробки ниток графіку при наданні послуг з розкладом руху маршрутних поїздів та приватних локомотивів

Вихідні дані для розробки спеціалізованих ниток за РРМП визначають порядком, як і для звичайного графіка у відповідності з Інструкцією з складання ГРП [33]. Єдиною важливою особливістю є визначення кількості ниток графіка вантажних поїздів, встановлення резервів часу та час їх відправлення за узгодженими заявками. Процедура розробки нитки графіка

ув'язана з системою планування перевезень, що відрізняє даний підхід від стандартної практики складання ГРП, коли момент відправлення вибирають на основі статистики використання ниток за попередні періоди або виходячи з правил складання ГРП. Можливість оформлення замовлень на перевезення вантажів за узгодженим розкладом руху маршрутних поїздів реалізовано в електронному вигляді з накладенням кваліфікованого електронного підпису, що дозволило пришвидшити процес оформлення замовлень.

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

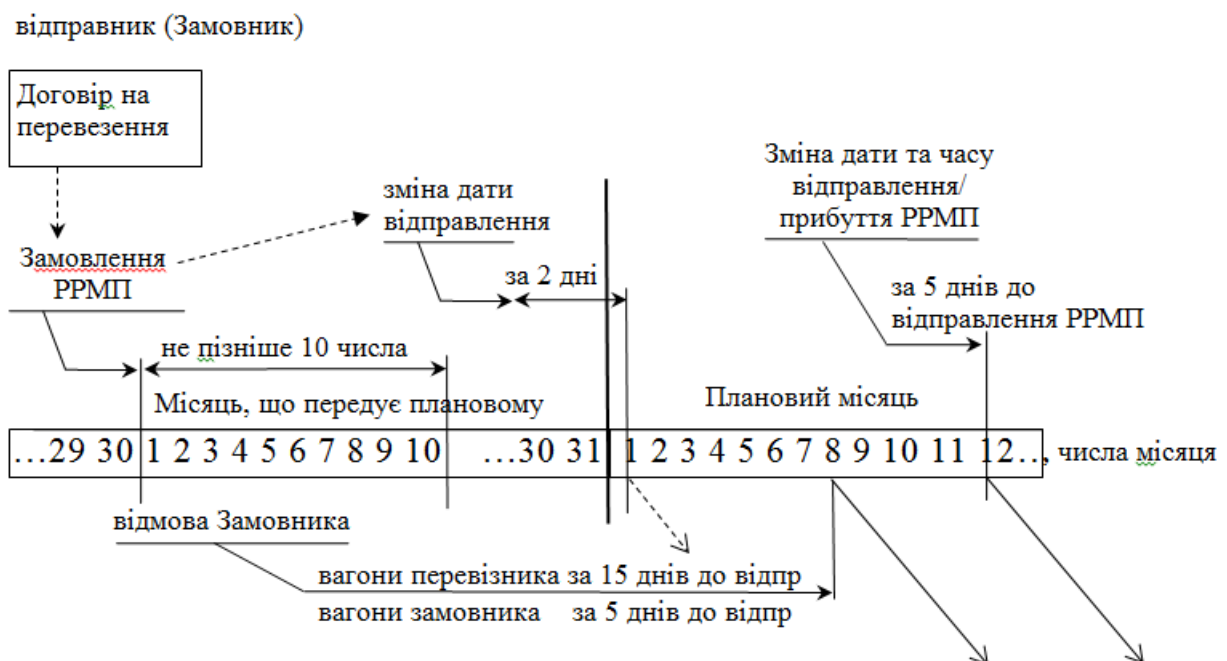


Рисунок 4.3 – Схема планування при наданні послуг з організації перевезень вантажів на особливих умовах – за узгодженим розкладом руху маршрутних поїздів

У випадку порушення часу прибуття маршрутного поїзду Перевізник сплачує штраф шляхом перерахунку плати, яку нараховано під час прийому

вантажу до перевезення, у розмірі 1%, але разом не більше ніж 20 %, від провізної плати – інфраструктурної складової тарифу нарахованого в такому перевезенні (без урахування її підвищення) за кожен повну годину порушення строків починаючи з 5 години запізнення. Сплата штрафу Перевізником відображається Перевізником в особовому рахунку Замовника, як попередня оплата за надання послуг.

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

Процедура складання графіку для перевезення вантажів за розкладом руху вантажних поїздів з приватними локомотивами (РПЛ) заснована на досвіді роботиз РРМП за єдиною різницею, що горизонт планування розширюється до одного року [135,136]. На рисунку 4.4 наведено схему планування розподілу (формування) графіку РПЛ.

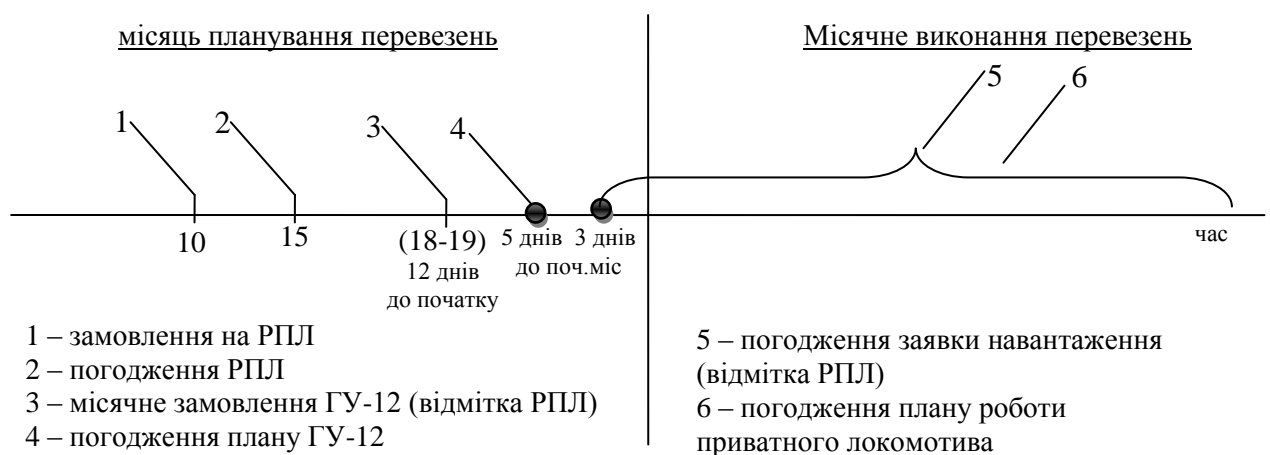


Рисунок 4.4 – Схема планування розподілу (формування) графіку для перевезення вантажів за розкладом руху вантажних поїздів з приватними локомотивами (РПЛ)

Окрім річного планування робочого графіка руху поїздів, проводиться планування на календарний місяць – щомісячно; позапланові перевезення - за 5 днів; перевезення ad hoc - за добу та реалізується оперативний план роботи до 15-00 кожної доби. В межах кожного з періодів планування при складанні нитки графіка та оцінці показників ГРП виникає завдання встановлення резервів у нитках графіку. Як показав аналіз схем планування на рис. 4.3 – 4.4 в багатьох етапах узгодження ниток графіка обмежений час в деяких випадках до трьох днів. В таких умовах експертним підходом визначити резерви досить складно, а на довготривалі креслення ГРП з різними варіантами резервів часу та взаємоув'язкою ниток на полігоні немає ресурсів та часу. Враховуючи, що дієвих процедур встановлення резервів немає важливо в межах кожного з етапів застосовувати удосконалений метод визначення резервів часу в нитках графіка на основі моделювання розповсюдження затримок поїздів, що запропонований в розділах 2 та 3 даного дисертаційного дослідження.

4.3.Формування функцій та вимог до автоматизованої підсистеми визначення величин резервів часу в нитках графіку

Відповідно до існуючого інформаційного забезпечення, діючих програмних додатків АТ Укрзалізниця та процедур складання ГРП, що передбачається реалізовувати при запланованій реформі залізничного транспорту України, в даній дисертації 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 [10].

В межах існуючої системи централізованого складання графіка руху поїздів запропоновано розробити автоматизовану підсистему на основі сформованих в даній дисертаційній роботі математичних моделей, методу моделювання розповсюдження затримок поїздів та процедури вибору раціональних резервів часу у нитках графіка. Важливою вимогою даної підсистеми повинна бути сумісність з ядром СЦСГР – програмним комплексом для автоматизованого розрахунку ГРП (АРМ Інженера-графіста) та ПП ГАС Railway, ПК „Динамік”. З причини наявності лише застарілих функцій в АРМ Інженера-графіста бажано розробити більш сучасний програмний комплекс автоматизації складання ГРП на базі діючої ПП ГАС Railway, де запропонована автоматизована підсистема визначення раціональних резервів часу в нитках графіка буде складовою єдиного комплексу. Схема функціональної взаємодії в єдиному інформаційному середовищі автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу у нитках графіка наведена на рисунку 4.5.

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

В межах СЦСГР на АРМ інженера-технолога зі складання ГРП повинна бути можливість взаємодії з календарною базою нормативних ГРП та іншими АС та підсистемами АСК ВП УЗ, а через спеціальний модуль взаємодії й з АСК ПП УЗ. Враховуючи, що в межах етапів планування та складання нормативного ГРП набуває важливого значення узгодження ниток графіка з відправниками вантажів та пасажирськими компаніями, а в майбутньому після реалізації реформування й компаніями-перевізниками в СЦСГР на СППР інженерів-технологів з розробки ГРП повинен бути взаємозв'язок з АС МЕСПЛАН, який в свою чергу поєднаний з АС Клієнт УЗ.

Розроблені нитки графіка з урахуванням визначених резервів часу в запропонованій автоматизованій підсистемі повинні узгоджуватись через інформаційні канали та єдиний простір СППР з фахівцями Головного та

Регіональних центрів управління перевезеннями. Після узгодження в межах інтерфейсу СППР на АРМ інженера-технолога зі складання графіка повинна бути функція завантаження нитки ГРП або всього листа ГРП до календарної бази ГРП. Для можливості здійснення перевезень за ГРП диспетчерський апарат через АРМ ДНЦ [134] або інші оперативні АРМи повинен мати можливість використовувати розроблені розклади в межах поточної роботи залізниці. Для забезпечення повного контура управління важливо автоматично передавати розклад слідування з урахуванням “нагону часу” при скороченні запізнь на бортові пристрої поїзних локомотивів на мережі або у випадку відсутності на планшети машиністів за досвідом залізниць SBB та інших.

Згідно до [33] знайдені резерви в автоматизованій підсистемі повинні вивантажуватись для передачі в електронному вигляді або друку в затверджених форматах для формування Додатку до графіка руху поїздів про скорочення запізнь поїздів (далі Додаток). Даний Додаток розробляється згідно з вимогами пункту 1.3 “Інструкції для обліку і аналізу виконання графіка руху пасажирських, приміських та вантажних поїздів” ЦД-ЦЧУ/0024 перед введенням нового графіка, при переході на осінньо-зимовий графік, а також після виконання ремонтних робіт, які сприяли відміні обмежень швидкості. В даному Додатку для кожного поїзда визначається резерв часу, який виникає при прямуванні по “нитці” графіка поїзда конкретної довжини та маси в умовах, що прогножуються, тобто: літом, зимою, по днях.

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

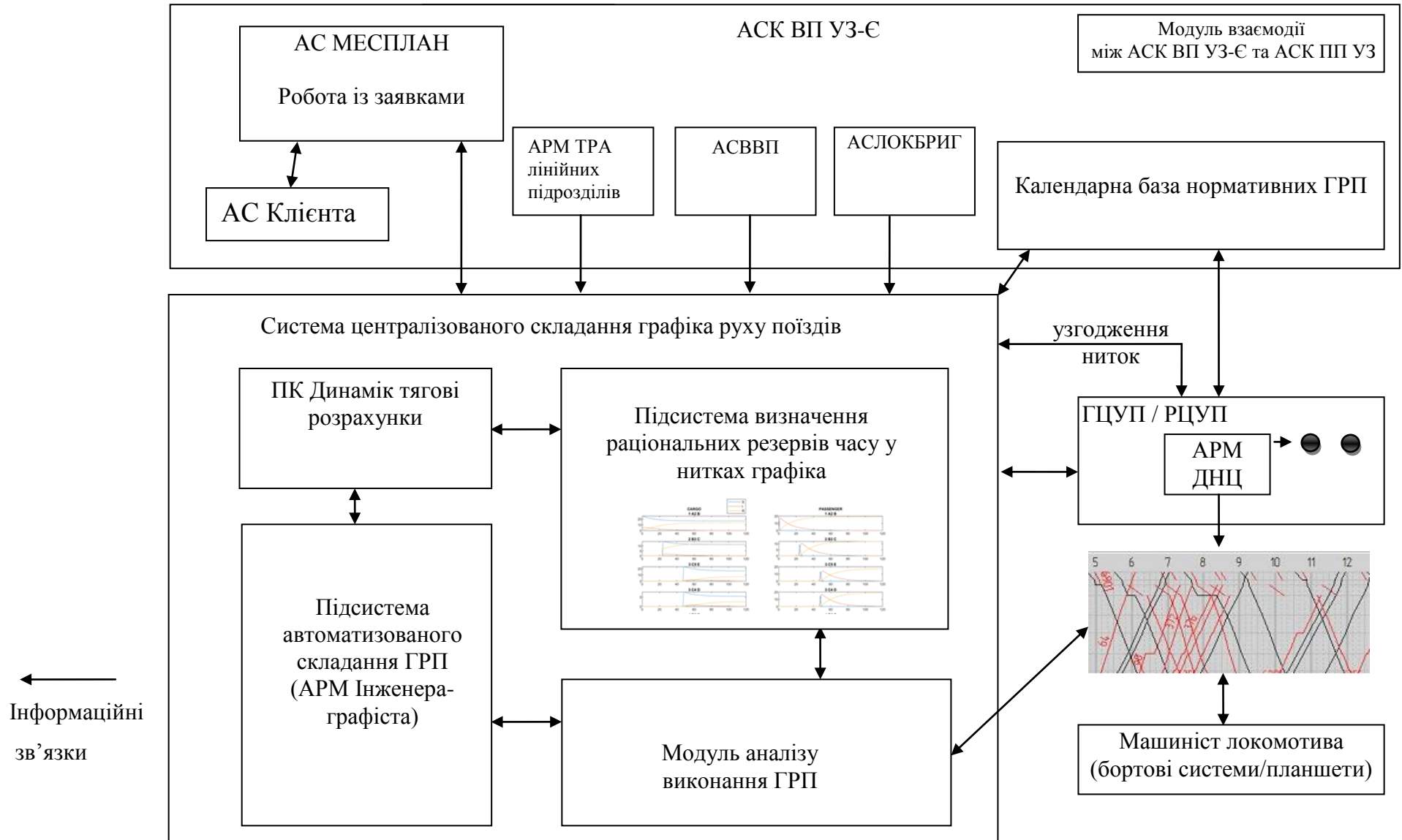


Рисунок 4.5 – Схема функціональної взаємодії в єдиному інформаційному середовищі автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу у нитках графіка

Запропоновано реалізувати автоматизовану підсистему в межах середовища ПП ГАС Railway [133]. На рисунку 4.6 наведено ескіз графічного інтерфейсу СППР автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу у нитках графіків.

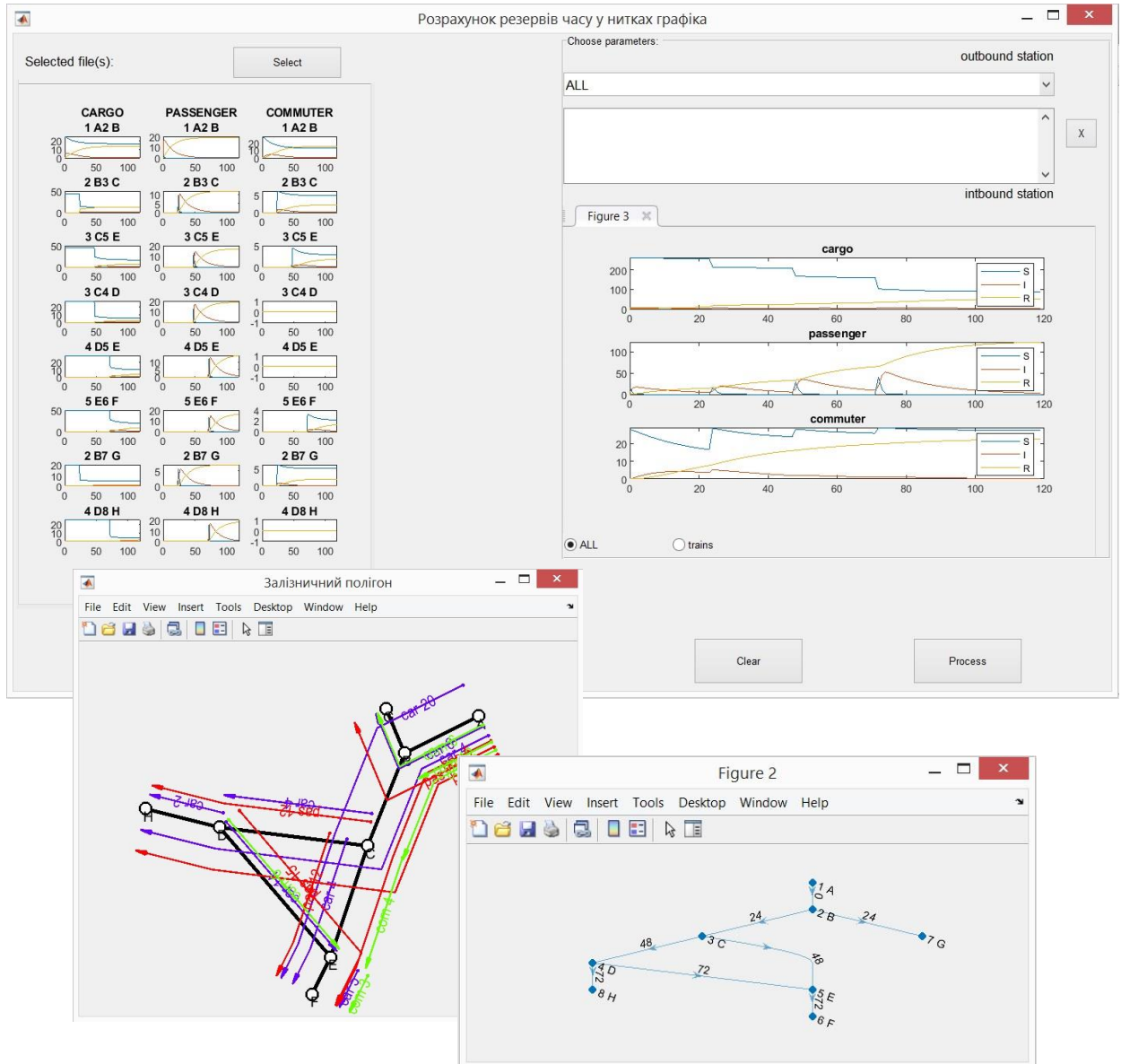


Рисунок 4.6 – Ескіз графічного інтерфейсу СППР автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу у нитках графіка в межах ПП ГАС Railway

4.4. Економічне обґрунтування від встановлення раціональної межі завантаження залізничного напрямку на основі автоматизації побудови графіка руху поїздів

Економічна ефективність досягається за рахунок підвищення надійності графіку руху поїздів на основі встановлення раціональних резервів часу у нитках графіка на залізниці України. Це дозволить зменшити кількість затримок поїздів на залізничній мережі України і, як наслідок, прискорити оборот вагону на 3,23% від існуючих показників.

Вихідні дані:

1. Робочий парк вантажних вагонів Укрзалізниці – $N_{роб}$, ваг на добу:

- за 2015 рік – 143312 ваг;
- за 2016 рік – 140964 ваг;
- за 2017 рік – 135792 ваг;
- за 2018 рік – 142547 ваг;
- за 2019 рік – 128303 ваг;
- за 2020 рік – 101704 ваг.

2. Середній оборот вантажного вагона – θ , діб:

- діючий варіант:
- за 2015 рік – 9,6 діб;
- за 2016 рік – 8,74 діб;
- за 2017 рік – 9,26 діб;
- за 2018 рік – 10,35 діб;
- за 2019 рік – 9,68 діб;
- за 2020 рік – 7,82 діб;

- після впровадження СППР на АРМ інженера-технолога з розробки ГРП для визначення величин резервів часу у нитках графіку нормативного ГРП – зменшення на 25,1% від існуючого;

3. Плановий термін розрахунку показника – 365 діб;

4. Питомі витрати на 1 вагоно-год. вагона вантажного парку – 2,05 грн;
5. Термін служби автоматизованої системи – 5 років;
6. Одночасні витрати на впровадження автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу у нитках графіку:
 - НДР – 500000 грн;
 - розробка програми – 500000 грн;
7. Річна ставка комерційних банків очікується в розмірі 14% ($E=0,14$);
8. Річний розмір інфляції в період здійснення проекту очікується в розмірі 9% ($I=0,09$);
9. Коефіцієнт ризику 0,01;
10. Розрахунковий рік 2021 – перший рік здійснення проекту.

За експертними оцінками можна припустити за песимістичним прогнозом, що запровадження автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу у нитках графіка дозволить зменшити елемент знаходження вантажного вагона в русі в межах загального середнього часу обороту до показників 2014 року. За таких умов у порівнянні з 2020 роком елемент в русі зменшиться на $28,61 - 22,54 = 6,07$ год, тоді прогнозно можна припустити, що загальний середній оборот вантажного вагона зменшиться на 3,23% у порівнянні з діючою технологією.

4.4.1 Прогнозування робочого парку вантажних вагонів на мережі АТ “Укрзалізниця” та середнього обороту вантажного вагону

Для надання прогнозної оцінки роботи залізничної мережі України в умовах впровадження автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу у нитках графіку на наступні п'ять років запропоновано виконати прогноз за допомогою методу екстраполяції на основі змінної середньої. Прогноз розраховується на основі даних приведених у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Дані робочого парку вантажних вагонів та середнього обороту вагонів по всім філіям АТ “Укрзалізниця” за 2015-2020 роки

Рік	Робочий парк вантажних вагонів АТ “Укрзалізниця”, ваг у середньому за добу	Середній оборот вантажного вагону, діб
2015	143312	9,6
2016	140964	8,74
2017	135792	9,26
2018	142547	10,35
2019	128303	9,68
2020	101704	7,82

Аналіз залежностей дозволяє висунути гіпотезу про степеневу функцію залежності. Щоб привести нелінійні залежності до лінійної функції запропоновано використати метод вирівнювання (линеаризації) - логарифмування. Отже, степенева функції зводиться до лінійного вигляду шляхом логарифмування за основою e ($e \approx 2,72$) - степеневе рівняння тренду має вид at^b ($\ln y = \ln a + b \ln t$).

Для проведення прогнозування необхідно знайти параметри рівняння методом найменших квадратів

Система рівнянь має вид:

$$\begin{cases} an + b \sum t = \sum y \\ a \sum t + b \sum t^2 = \sum yt \end{cases} \quad (4.1)$$

Результати розв'язання для часового ряду величин робочого парку вагонів наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Допоміжна таблиця для обчислення параметрів системи рівнянь для функції прогнозування робочого парку вантажних вагонів АТ “Укрзалізниця”

$\ln(t)$	$\ln(y)$	t^2	y^2	$t y$
0	11,873	0	140,963	0
0,693	11,856	0,48	140,571	8,218
1,099	11,819	1,207	139,686	12,984
1,386	11,867	1,922	140,836	16,452
1,609	11,762	2,59	138,348	18,93
1,792	11,53	3,21	132,937	20,659
6,579	70,707	9,41	833,34	77,243
Ср.знач.	11,785	1,568	138,89	12,874

Для даних таблиці 4.2 система рівнянь має вигляд:

$$6a + 6,58b = 70,71$$

$$6,58a + 9,41b = 77,24$$

З першого рівняння виражаємо a та підставимо у друге рівняння. Отримуємо $a = 11,929$, $a = -0,132$. Отже, рівняння тренду: $y = 151672,588t^{-0,132}$ для прогнозування робочого парку вантажних вагонів.

Емпіричні коефіцієнти тренда a і b є лише оцінками теоретичних коефіцієнтів β_i , а саме рівняння відображає лише загальну тенденцію в поведінці розглянутих змінних.

Помилка апроксимації або якість рівняння тренда запропоновано оцінити за допомогою середньої відносної помилки апроксимації, що розраховується за виразом

$$\bar{A} = \frac{\sum |y_t - y_i| : y_i}{n} 100\% . \quad (4.2)$$

$$\bar{A} = \frac{0,03745}{6} 100\% = 0,62\% .$$

Оскільки помилка складає 0,62%, то дане рівняння можна використовувати в якості тренда.

Визначимо середньоквадратичну помилку показника, що прогнозується

$$U_y = y_{n+1} \pm K , \text{ де}$$

$$K = t_\alpha S_y \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{3(n+2L-1)^2}{n(n^2-1)}} ,$$

де L - період попередження; y_{n+L} - точковий прогноз за моделлю на $(n+L)$ -й момент часу; n - кількість спостережень в часі ряду; S_y - стандартна помилка прогнозованого показника; $T_{табл}$ - табличне значення критерію Стюдента для рівня значущості α і для числа ступенів свободи, рівного $n-2$. За таблицею Стюдента знаходимо $T_{табл}$.

$$T_{табл}(n-m-1; \alpha/2) = 2,776$$

Точковий прогноз

$$t = 7 : y(7) = 11,929 \cdot 7^{-0,132} = 117277,08 .$$

$$K_1 = 2,776 \cdot 0,11 \sqrt{1 + \frac{1}{6} + \frac{3(6+2 \cdot 1-1)^2}{6(6^2-1)}} = 0,42$$

$$117277,08 - 0,42 = 117276,66; \quad 117277,08 + 0,42 = 117277,5$$

Інтервальний прогноз

$$t = 7 : (117277,08; 117276,5)$$

Точковий прогноз

$$t = 8 : y(8) = 11,929 \cdot 8^{-0,132} = 115255,48 .$$

$$K_2 = 2,776 \cdot 0,11 \sqrt{1 + \frac{1}{6} + \frac{3(6+2 \cdot 2-1)^2}{6(6^2-1)}} = 0,46$$

$$115225,48 - 0,46 = 115225,02; \quad 115225,48 + 0,46 = 115225,94$$

Інтервальний прогноз

$$t = 8: (115225,02; 115225,94)$$

Точковий прогноз

$$t = 9: y(9) = 11,929 \cdot 9^{-0,132} = 113445,65.$$

$$K_2 = 2,776 \cdot 0,11 \sqrt{1 + \frac{1}{6} + \frac{3(6 + 2 \cdot 3 - 1)^2}{6(6^2 - 1)}} = 0,52$$

$$113445,65 - 0,52 = 113445,13; \quad 113445,65 + 0,52 = 113446,17$$

Інтервальний прогноз

$$t = 9: (113445,13; 113446,17)$$

Точковий прогноз

$$t = 10: y(10) = 11,929 \cdot 10^{-0,132} = 111877,43.$$

$$K_2 = 2,776 \cdot 0,11 \sqrt{1 + \frac{1}{6} + \frac{3(6 + 2 \cdot 4 - 1)^2}{6(6^2 - 1)}} = 0,58$$

$$111876,85 - 0,58 = 111876,27; \quad 111876,85 + 0,58 = 111877,43$$

Інтервальний прогноз

$$t = 10: (111876,27; 111877,43)$$

Точковий прогноз

$$t = 11: y(11) = 11,929 \cdot 11^{-0,132} = 110476,39.$$

$$K_5 = 2,776 \cdot 0,11 \sqrt{1 + \frac{1}{6} + \frac{3(6 + 2 \cdot 5 - 1)^2}{6(6^2 - 1)}} = 0,64$$

$$110476,39 - 0,64 = 110475,75; \quad 110476,39 + 0,64 = 110477,03.$$

Інтервальний прогноз

$$t = 11: (110475,75; 110477,03).$$

Для доведення справедливості висунутої гіпотези щодо розрахованих коефіцієнтів лінійного рівняння тренду в дослідженні запропоновано провести перевірку отриманої математичної моделі на адекватність за критерієм Фішера. Коефіцієнт детермінації розраховано за виразом:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{0,04801}{0,08636} = 0,4441.$$

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \frac{n - m - 1}{m} = \frac{0,4441}{1 - 0,4441} \frac{6 - 1 - 1}{1} = 3,1952.$$

Знаходимо з таблиці $F_{kp}(1;4;0,05) = 0$, де m – кількість факторів в рівнянні тренду ($m = 1$).

Оскільки $F > F_{kp}$ $3,1952 > 0$, то коефіцієнт детермінації (і в цілому рівняння степеневого тренда) статистично значимий. Отримані оцінки рівняння регресії дозволяють використовувати його для прогнозу робочого парку вагонів.

З аналогічним підходом запропоновано знайти параметри рівняння (4.1) методом найменших квадратів для функції, що описує залежність тренду середнього обороту вагона на мережі АТ “Укрзалізниця”. Результати розв’язання для часового ряду величин робочого парку вагонів наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Допоміжна таблиця для обчислення параметрів системи рівнянь для функції прогнозування середнього обороту вагона

$\ln(t)$	$\ln(y)$	t^2	y^2	$t y$
0	2,262	0	5,116	0
0,693	2,168	0,48	4,7	1,503
1,099	2,226	1,207	4,954	2,445
1,386	2,337	1,922	5,462	3,24
1,609	2,27	2,59	5,153	3,654
1,792	2,057	3,21	4,23	3,685
6,579	13,319	9,41	29,614	14,526
Ср.знач.	2,22	1,568	4,936	2,421

Для даних таблиці 4.3 система рівнянь має вигляд:

$$6a + 6,58b = 13,32$$

$$6,58a + 9,41b = 14,53$$

З першого рівняння виражаємо a та підставимо у друге рівняння.

Отримуємо $a = 2,259$, $a = -0,0359$. Отже, рівняння тренду: $y = 9,575t^{-0,0359}$ для прогнозування робочого парку вантажних вагонів.

Помилка апроксимації або якість рівняння тренда запропоновано оцінити за допомогою середньої відносної помилки апроксимації, що розраховується за виразом

$$\bar{A} = \frac{0,1864}{6} 100\% = 3,11\%$$

Оскільки помилка складає 3,11%, то дане рівняння можна використовувати в якості тренда. Помилка апроксимації в межах 5% -7% свідчить про гарний підбір рівняння тренда до вихідних даних.

Розрахунок прогнозу

Точковий прогноз

$$t = 7 : y(7) = 2,259 \cdot 7^{-0,0359} = 8,93.$$

$$K_1 = 2,776 \cdot 0,11 \sqrt{1 + \frac{1}{6} + \frac{3(6 + 2 \cdot 1 - 1)^2}{6(6^2 - 1)}} = 0,4$$

$$8,93 - 0,4 = 8,53; 8,93 + 0,4 = 9,33$$

Інтервальний прогноз

$$t = 7 : (8,53; 9,33)$$

Точковий прогноз

$$t = 8 : y(8) = 2,259 \cdot 8^{-0,0359} = 8,89$$

$$K_2 = 2,776 \cdot 0,11 \sqrt{1 + \frac{1}{6} + \frac{3(6 + 2 \cdot 2 - 1)^2}{6(6^2 - 1)}} = 0,45$$

$$8,89 - 0,45 = 8,44; 8,89 + 0,45 = 9,34$$

Інтервальний прогноз

$$t = 8: (8,44;9,34)$$

Точковий прогноз

$$t = 9: y(9) = 2,259 \cdot 9^{-0,0359} = 8,85$$

$$K_3 = 2,776 \cdot 0,11 \sqrt{1 + \frac{1}{6} + \frac{3(6 + 2 \cdot 3 - 1)^2}{6(6^2 - 1)}} = 0,5$$

$$8,85 - 0,5 = 8,35; 8,85 + 0,5 = 9,35$$

$$t = 9: (8,35;9,35)$$

Точковий прогноз

$$t = 10: y(10) = 2,259 \cdot 10^{-0,0359} = 8,82$$

$$K_4 = 2,776 \cdot 0,11 \sqrt{1 + \frac{1}{6} + \frac{3(6 + 2 \cdot 4 - 1)^2}{6(6^2 - 1)}} = 0,55$$

$$8,82 - 0,55 = 8,27; 8,82 + 0,55 = 9,37$$

Інтервальний прогноз

$$t = 10: (8,27;9,37)$$

Точковий прогноз

$$t = 11: y(11) = 2,259 \cdot 10^{-0,0359} = 8,79$$

$$K_5 = 2,776 \cdot 0,11 \sqrt{1 + \frac{1}{6} + \frac{3(6 + 2 \cdot 5 - 1)^2}{6(6^2 - 1)}} = 0,61$$

$$8,79 - 0,61 = 8,18; 8,79 + 0,61 = 9,4$$

Інтервальний прогноз

$$t = 11: (8,18;9,4).$$

Для доведення справедливості висунутої гіпотези щодо розрахованих коефіцієнтів лінійного рівняння тренду в дослідженні запропоновано

провести перевірку отриманої математичної моделі на адекватність за критерієм Фішера. Коефіцієнт детермінації розраховано за виразом:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \bar{y}_t)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{0,04453}{0,04735} = 0,05963$$

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \frac{n - m - 1}{m} = \frac{0,05963}{1 - 0,05963} \frac{6 - 1 - 1}{1} = 0,2536$$

Знаходимо з таблиці $F_{kp}(1;4;0,05) = 0$, де m – кількість факторів в рівнянні тренду ($m = 1$).

Оскільки $F > F_{kp}$ $0,2536 > 0$, то коефіцієнт детермінації (і в цілому рівняння степеневого тренда) статистично значимий. Отримані оцінки рівняння регресії дозволяють використовувати його для прогнозу робочого парку вагонів.

Рівняння тренду для робочого парку вантажних вагонів АТ “Укрзалізниці” має вигляд

$$y = 151672,588t^{-0,132}.$$

Рівняння тренду для обороту вантажного вагона має вигляд

$$y = 9,575t^{-0,0359}.$$

Прогнозний тренд величини робочого парку вантажних вагонів АТ “Укрзалізниці” на наступні п’ять років наведена на рисунку 4.5.

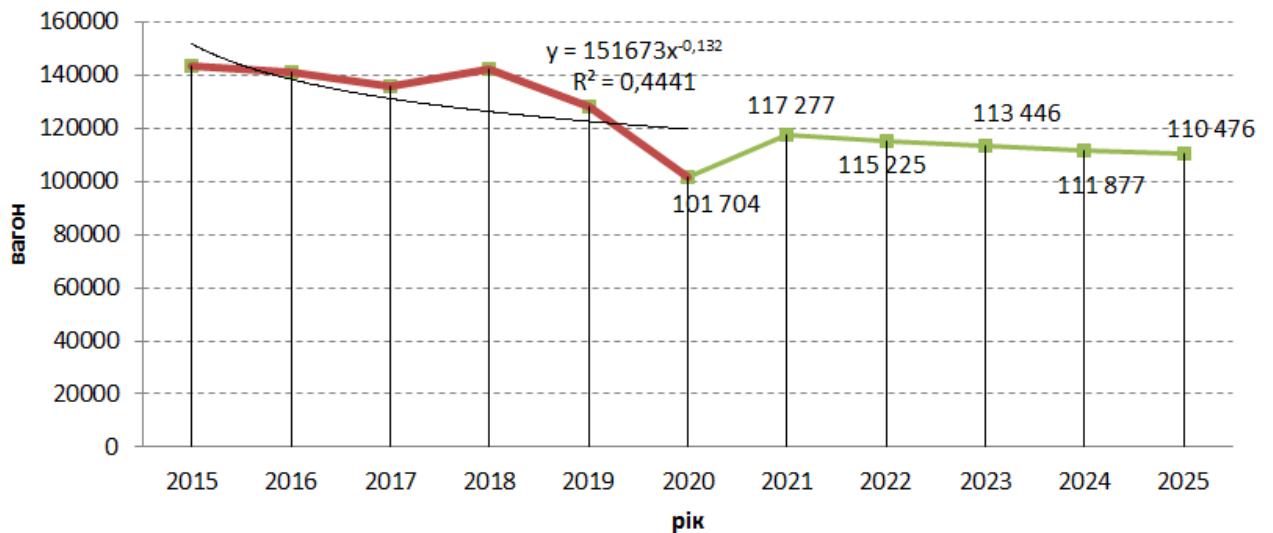


Рисунок 4.5 – Прогнозний тренд величини робочого парку вантажних вагонів АТ “Укрзалізниця” на період 2021-2025

Прогнозний тренд величини робочого парку вантажних вагонів АТ “Укрзалізниця” на наступні п’ять років наведена на рисунку 4.6.

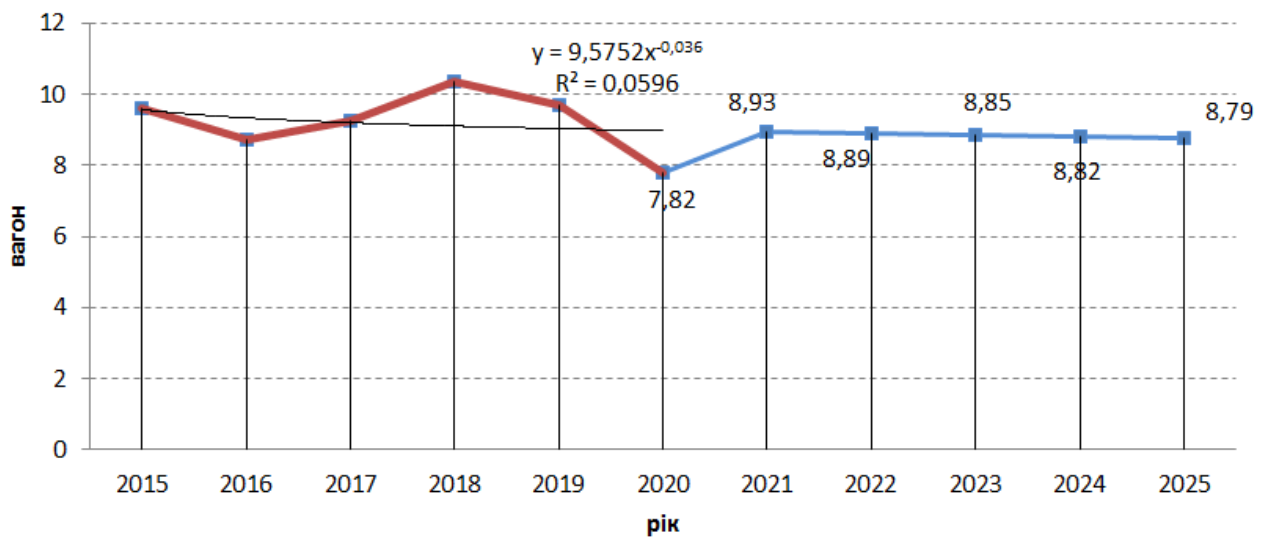


Рисунок 4.6 – Прогнозний тренд величини середнього обороту вантажного вагону АТ “Укрзалізниця” на період 2021-2025

4.4.2 Розрахунок економічного ефекту від автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу у нитках графіка

Економія витрат ΔE_t від прискорення обороту вагону можна визначити за виразом

$$\Delta E_t = N_p \left(1 - \frac{\theta'}{\theta} \right) T e_{\text{в.г.}}, \quad (4.3)$$

де θ' – середній час обороту вагона після впровадження автоматизованої підсистеми визначення раціональних резервів часу у нитках графіка, діб;

θ – середній час обороту вагона до впровадження автоматизованої підсистеми, діб;

N_p – робочий парк вантажних вагонів, ваг;

$e_{\text{в.г.}}$ – витратна ставка за одну вагоно-годину, грн.

Розрахунок сумісного економічного ефекту від прискорення обороту вантажного вагона з урахуванням капітальних витрат та приведенням до поточного року розраховуються за виразом [137-140]

$$F = \sum_{t=1}^5 (\Delta E_t - K_t) \alpha_t \quad (4.4)$$

де K_t – капітальні витрати проекту, грн.;

α_t – коефіцієнт приведення.

Коефіцієнт приведення результатів та витрат визначається за формулою [138]:

$$\alpha_t = \frac{1}{[(1 + E)(1 + I + R)]^{t_p - t_k}}, \quad (4.5)$$

де E – річна ставка комерційних банків за депозитними внесками, 14 %;

I – щорічний рівень інфляції в період здійснення проекту, 9 %;

t_k – порядковий номер того року, грошові потоки якого приводяться до розрахункового;

R – ризики, 2%;

t_p – порядковий номер розрахункового року.

Розрахунок коефіцієнта приведення результатів:

$$\alpha_{t=1} = \frac{1}{[(1 + 0,14)(1 + 0,09 + 0,02)]^{5-5}} = 1,00;$$

$$\alpha_{t=2} = \frac{1}{[(1 + 0,14)(1 + 0,09 + 0,02)]^{5-4}} = 0,79;$$

$$\alpha_{t=3} = \frac{1}{[(1 + 0,14)(1 + 0,09 + 0,02)]^{5-3}} = 0,62;$$

$$\alpha_{t=4} = \frac{1}{[(1 + 0,14)(1 + 0,09 + 0,02)]^{5-2}} = 0,49;$$

$$\alpha_{t=5} = \frac{1}{[(1 + 0,14)(1 + 0,09 + 0,02)]^{5-1}} = 0,39.$$

Розрахунок економічного ефекту 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 наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Розрахунок економічного ефекту від впровадження запровадження автоматизованої підсистеми встановлення раціональних резервів часу у нитках графіка на залізниці України

Розрахункові показники	2021	2022	2023	2024	2025
До впровадження					
Робочий парк вантажних вагонів Укрзалізниці	117277,08	115225,48	113445,65	111876,85	110476,39
Середній оборот вантажного вагона, доба	8,93	8,89	8,85	8,82	8,79
Експлуатаційні витрати, тис грн	48806800,83	47738198,44	46789333,3	45985885,48	45255783,49
Загальні витрати, тис грн	48806800,83	47738198,44	46789333,3	45985885,48	45255783,49
Після впровадження					
Прогнозний середній оборот вантажного вагона, діб	8,64	8,60	8,56	8,54	8,51
Капітальні витрати: НДР+розробка програми, тис грн	1000				
Економічний ефект від прискорення обороту вагона Et, тис грн	176535,24	173447,00	170767,85	168406,36	166298,27
Економічний ефект з урахуванням капітальних витрат Et-Kt, тис грн	175535,24	173447,00	170767,85	168406,36	166298,27
Коефіцієнт приведення до розрахункового	1	0,79	0,62	0,49	0,39
Економ. ефект з урахуванням коеф. привед., тис. грн	175535,24	137023,13	105876,07	82519,12	64856,33
Економ. ефект наростаючим підсумком, тис. грн	175535,24	312558,37	418434,43	500953,55	565809,87

Економічне обґрунтування запропонованих заходів доводить, що після введення автоматизованої підсистеми встановлення раціональних резервів часу у нитках графіка на залізниці України підвищиться надійність графіка руху поїздів і зменшиться вплив затримок на величину складової елементу знаходження вагона в русі в межах загального обороту. 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.

4.5. Висновки до розділу 4

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

2. Відповідно до існуючого інформаційного забезпечення, діючих програмних додатків АТ “Укрзалізниця” та процедур складання ГРП, що передбачається реалізовувати при запланованій реформі залізничного транспорту України, в даній дисертації 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.

Для реалізації СППР рекомендовано врахувати етапи розробки і прийняття рішень в процесі планування перевезень вантажів за РРМП та розкладом руху вантажних поїздів з приватними локомотивами (РПЛ).

3. Проведено дослідження процедур планування та розробки ниток графіку при наданні послуг з організації перевезень вантажів на особливих умовах – за узгодженим розкладом руху маршрутних поїздів (РРМП) та розроблені ниток для доступу приватних локомотивів до залізничної інфраструктури АТ “Укрзалізниця”. Виявлено, що дієвих процедур встановлення резервів у нитках графіка немає. Рекомендовано реалізувати автоматизовану підсистему визначення резервів часу в нитках графіка та в межах кожного з етапів планування та розробки ниток для РРМП та РПЛ застосовувати удосконалений метод визначення резервів часу в нитках графіка на основі моделювання розповсюдження затримок поїздів, що запропонований в розділах 2 та 3 даного дисертаційного дослідження.

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

5. Економічне обґрунтування запропонованих заходів доводить, що після введення автоматизованої підсистеми встановлення раціональних резервів часу у нитках графіка на залізниці України підвищиться надійність графіка руху поїздів і зменшиться вплив затримок на величину складової елементу знаходження вагона в русі в межах загального обороту. 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 у нитках графіку з використанням моделювання розповсюдження затримок поїздів. Це дозволить підвищити швидкість та якість складання нормативного графіку 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 строків доставки вантажів, пунктуальність та 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 та 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 порівнянні з 2015 роком. Виявлено, що затримки в мережі згубно впливають на строки доставки вантажів, зокрема у грудні 2019 року в середньому за добу порушувалась доставка у 43,3 вантажні відправки. Це свідчить про значні проблеми в системі планування руху поїздопотоків та відсутності достатнього рівня надійності ГРП.

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 – зниження на 84,1%. Паралельний аналіз різниць величин стандарту UIC 451-1 OR з реальними даними часу резервів у нитках нормативного графіка руху поїздів довів зниження даних величин для вантажних поїздів на 11,8%; для пасажирських – завищення на 78,5%; для приміських – зниження 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 їх резервів компенсації часу при русі на надійність нормативного графіку руху поїздів. Даний макрорівневий підхід до моделювання розповсюдження затримок поїздів передбачає застосування методу машинного навчання для здобуття знань з даних реальних затримок поїздів на дільниці при пошуку параметрів диференціальних рівнянь SIR-моделі та проведення моделювання розповсюдження затримки з різними швидкостями відновлення руху.

4. Для пошуку раціональних резервів часу на відновлення руху поїздів різних категорій в залежності від кількості затриманих поїздів у графіку руху

розроблено метод на основі моделювання розповсюдження затримок поїздів на розгалужених залізничних полігонах. Даний метод дозволяє врахувати поширення первинної затримки у просторі і часі за рахунок представлення топології залізничної мережі у вигляді неорієнтованого графу з прив'язкою до ребра графу 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 у нитках графіку для підвищення швидкості та якості складання нормативного графіку руху поїздів на залізниці України у межах інформаційного середовища системи АСК ВП УЗ-Є та діючих програмних продуктів з розробки ГРП. Виявлено, що відсутні дієві процедури для встановлення резервів у нитках графіку при плануванні перевезень за розкладом руху маршрутних поїздів (РРМП) та розробці ниток для доступу приватних локомотивів до залізничної інфраструктури АТ “Укрзалізниця”. Згідно до чого розроблені рекомендації застосування удосконаленого методу визначення резервів часу у нитках графіку 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 розробки ГРП для визначення величин резервів часу у 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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. № 169.С. 205-213.
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.
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.
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.
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.
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
7. Гурін Д.О. Аналіз технології організації місцевої роботи дільниць. *75 студентська науково-технічна конференція: тези 75 студентської науково-технічної конференції*. Збірник наукових праць студентів та магістрів(м. Харків, 13-15 листопада 2013 р.).Харків, 2013. С.208-209.
 8. Гурін Д.О. Дослідження впливу величини резерву часу на надійність графіку руху поїздів на основі епідеміологічної SIR-моделі. *33-я міжнародна науково-практична конференція «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*: тези стендових доповідей та виступів учасників конференції (м. Харків, 30 жовтня 2020 р.). 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» : збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні технології управління транспортними процесами», (м. Харків, 17-18 листопада 2020 р.). 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 одноколіїній залізничній дільниці. *Міжнародна науково-*

- технічна конференція «Енергоефективність на транспорті». Секції 3 “Енергоефективність рухомого складу та перевезень”* :тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Енергоефективність на транспорті». (м. Харків, 18-20 листопада 2020 р.). 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»* :збірка наукових праць. (м. Харків, 29 грудня 2020 р.). Харків, Х.: Технологічний Центр, 2020. С.56. e-ISBN 978-617-7319-29-9
 13. Транспортна стратегія України на період до 2030р. розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. N 430-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text> (дата звернення: 12.09.2019).
 14. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським Співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони, ратифіковано із заявою Законом <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1678-18/paran2> - n2 № 1678-VII від 16.09.2014 р. URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/984_011 (дата звернення 20.08.2020).
 15. План заходів з виконання Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони, затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 25 жовтня 2017 р. № 1106. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1106-2017-%D0%BF#n10> (дата звернення 01.10.2020).
 16. Директива 95/18/ЄС "Щодо залізничних підприємств" URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/994_952 (дата звернення 15.06.2020).

17. COUNCIL DIRECTIVE 95/19/EC of 19 June 1995 on the allocation of railway infrastructure capacity and the charging of infrastructure fees. *Official Journal of the European Communities*(L 143),1995.- 115 p.
18. Directive 2001/12/EC of the European Parliament and of the Council of 26 February 2001 amending Council Directive 91/440/EEC on the development of the Community's railways. THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION // *Official Journal of the European Communities* (OJ L 075/1), 2001. 25p.
19. Directive 2001/13/EC of the European Parliament and of the Council of 26 February 2001 amending Council Directive 95/18/EC on the licensing of railway undertakings. THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION // *Official Journal of the European Communities* (OJ L 75/26), 2001.3p.
20. Directive 2001/14/EC of the European Parliament and of the Council of 26 February 2001 on the allocation of railway infrastructure capacity and the levying of charges for the use of railway infrastructure and safety certification. THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION // *Official Journal of the European Communities* (OJ L 75/29), 2001.– 18p.
21. Інтегрований річний звіт АТ “Укрзалізниця” 2019. Київ. 234 с.
22. Кабмін очікує від "Укрзалізниці" в 2020 році прибуток 69 тис грн. Фінанси та економіка. URL: <http://finbalance.com.ua/news/ukrzaliznitsya-planu-v-2020-rotsi-otrimati-pributok-69-tis-hrn> (дата звернення 20.09.2020).
23. Транспорт України 2019. Державна служба статистики України, Київ, 2020. - 115 с. URL: https://ukrstat.org/uk/druk/publicat/kat_u/2020/zb/10/zb_trans_19.pdf (дата звернення 20.09.2020).
24. У 2019 перевезення контейнерів Укрзалізницею зросло на 14,64 %. Олексій Кулак. Rail.insider. URL: <https://www.railinsider.com.ua/v-2019-perevezennya-kontejneriv-ukrzaliznyczeu-zroslo-na-1464/> (дата звернення 20.09.2020).

25. Звіт про результати дослідження ринку перевезення вантажів залізничним транспортом за 2017-2018 роки. Антимонопольний комітет України. 2019 р. URL: https://amcu.gov.ua/storage/app/sites/1/imported_content/5d690ffe9bad7.pdf (дата звернення 21.09.2020).
26. Dick C. T., Darkhan M. Transitioning from flexible to structured heavy haul operations to expand the capacity of single-track shared corridors in North America. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit*. 233(6). 2019. P. 629-639. doi:10.1177/0954409718804427.
27. Зміна парадигми: PSR або концепція залізниці "на час". Прохорченко А.В. Центр транспортних стратегій. URL: https://cfts.org.ua/blogs/zmina_paradigmi_psr_abo_kontseptsiya_zalznitsi_na_chas_457 (дата звернення 01.11.2020).
28. Прохорченко Г.О., Щербацька А.І., Ткачук М.М. Дослідження впливу величини резерву часу на надійність графіка руху швидкісних поїздів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017. №169. С. 205-213.
29. Peterson Anders, LiU Deliverable D 3.1 Analysis of the gap between daily timetable and operational traffic. FR8RAIL II. 2018. URL: <http://liu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1391876&dswid=-72> (дата звернення 02.11.2020).
30. Dirnberger J. R., Barkan Christopher P. L. Lean Railroading for Improving Railroad Classification Terminal Performance. Bottleneck Management Methods. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1995. *Transportation Research Board of the National Academies*, Washington, D.C., 2007, pp. 52–61. DOI: 10.3141/1995-07
31. Fraga-Lamas, P., Fernández-Caramés, T., Castedo, L. Towards the Internet of Smart Trains: A Review on Industrial IoT-Connected Railways. *Sensors*. 2017. 17. doi: 10.3390/s17061457.

32. UIC 451-1 OR. Timetable recovery margins to guarantee timekeeping – *Recovery margins. International Union of Railways, France, 4e édition. Version traduite. List of recent publications, 2000. 15 p.*
33. Інструкція зі складання графіка руху поїздів на залізницях України, затверджена наказом Укрзалізниці від 05.04.2002 № 170-Ц. Чинна від 01.04.2006. *Київ: Транспорт України, 2003. 146 с.*
34. Butko T., Prokhorchenko A., Golovko T., Prokhorchenko G. Development of the method for modeling the propagation of delays in noncyclic train scheduling on the railroads with mixed traffic. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. №1, Issue 3 (91). P. 30-39. doi: 10.15587/1729-4061.2018.123141*
35. Schittenhelm, B. Planning with timetable supplements in railway timetables Berndt Schittenhelm. *Trafikdag på Aalborg Universitet. 2011. P. 1-18.*
36. Jousset Jean-Marc, Système d'information et gestion des circulations ferroviaires, in *Revue Générale des Chemins de Fer. 2004. Vol. 12. P. 11-23.*
37. Nakamura, H. How to Deal with Revolutions in Train Control Systems. *Engineering. 2016. Vol. 2. Issue 3. P. 380-386.*
38. Fukami, K., Yamamoto H. A new diagram forecasting system for the Tokaido-Sanyo Shinkansen. *Central Japan Railway Company, 2-6-2 Otemachi. Chiyodaku. Tokyo. Japan.*
39. Isaksson-Lutteman, G. Future Train Traffic Control. Development and deployment of new principles and systems in train traffic control. Dissertation for the degree of Licentiate of Technology in Computer Science. Printed by the Department of Information Technology, Uppsala University, Swedn. 2012. 130 p.
40. Bruckmann M. Schienenpersonenfernverkehr (SPFV). Marketing & Vertrieb. Marktsegmente SPFV, Trassen TPS 2018, 2017 Deutsche Bahn AG. Zugangsweise: URL: https://fahrweg.dbnetze.com/fahrweg/de/kunden/leistungen/trassen/uebersich_tps2018/marktsegmente_spfv-1392238 (angesehen am September 24, 2019).

41. Muzylyov, D., Shramenko, N., Tonkonogyi V. Blockchain Technology in Transportation as a Part of the Efficiency in Industry 4.0 Strategy. *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes*, InterPartner 2019, Odessa, 10-13 September 2019. 2020. P. 216-225.
42. Bibik S., Strelko O., Nesterenko H., Muzykin M., Kuzmenko A. Formulation of the mathematical model for the planning system in the carriage of dangerous goods by rail. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 985. P. 012024. doi:10.1088/1757-899X/985/1/012024
43. Schittenhelm, B. Planning with timetable supplements in railway timetables. *Trafikdagepå Aalborg Universitet*, 2011. 18 p.
44. Kroon, L. G., Dekker, R., Vromans, M. J. C. M., *Cyclic Railway Timetabling: A Stochastic Optimization Approach*, *Railway Optimization 2004*, LNCS 4359, pp 41-66, Springer Verlag 2007
45. Olsson N. O. E. and Hiselius L. W. 2018 The Planners' Perspective on Train Timetable Errors in Sweden. *Journal of Advanced Transportation* 8502819 17
46. Büker, T., Seybold, B. Stochastic modelling of delay propagation in large networks. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2012. Vol. 2. P. 34-50.
47. OnTime. Networkwide Analysis of Timetable Stability. trafIT solutions and VIA Consulting & Development. URL: http://www.ontime-rail.com/index_en.html (last accessed: 27 September 2020)
48. Franke B., Lieberherr J., Kaeslin L. Kombinierte betriebliche und verkehrliche Bewertung von Bahn-Angeboten. *Schweiz: Bewertung von Bahn-Angeboten*. ETR. 2018. P. 26-29.
49. Wüst R., Bütikofer S., Ess S., Gomez C., Steiner A. Development of a prototype for the automated generation of timetable scenarios specified by the transport service intention. Final report (28 June 2019). Zurich University of Applied Sciences, Institute of Data Analysis and Process Design, Winterthur, Switzerland.

URL:https://digitalcollection.zhaw.ch/bitstream/11475/18564/5/SBBLab_final_report_update_20190628_v3.pdf

50. Курган М.Б., Маркова О.С. Втрати часу руху поїздів на ділянках обмеження швидкості. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В.Лазаряна*. 2007. Вип. 18. С. 54-61.
51. Баланов В.О. Аналіз факторів, які впливають на забезпечення руху вантажних поїздів за розкладом. Транспортні системи та технології перевезень. *Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В.Лазаряна*. 2015. Вип.10. С. 5-9.
52. Козаченко Д.М., Березовий М.І., Баланов В.О., Журавель В.В. Резерви часу при організації руху вантажних поїздів за розкладом. Експлуатація та ремонт засобів транспорту. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В.Лазаряна*. 2015. № 2 (56). С. 108
53. Бобровський В.І., Коробйова Р.Г., Баланов В.О. Імітаційна модель для оцінки пропускної здатності залізниць. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В.Лазаряна*. 2018. №6 (78). С.16-27
54. Garrisi G., Cervelló-Pastor C. Train-Scheduling Optimization Model for Railway Networks with Multiplatform Stations. *Sustainability*. 2020. Vol.12. 257. doi:10.3390/su12010257
55. Ghaemi N., Cats O., Goverde R.M.P. Railway disruption management challenges and possible solution directions. *Public Transport*. 2017. Vol. 9. P, 343-364. Doi: 10.1007/s12469-017-0157-z
56. Zhan S., Kroon L.G, Veelenturf L.P, Wagenaar J.C. Real-time high-speed train rescheduling in case of a complete blockage. *Transp Res Part B Methodol*. 2015. Vol.78. P. 182-201.

57. Chiang T., Hau H., Chiang H. M., Kob S. Y., Hsieh C. H. Knowledge-based system for railway scheduling. *Data & Knowledge Engineering*. 1998. Vol. 27/3. P. 289-312. Doi:10.1016/S0169-023X(97)00040-2
58. Kariyazaki K., Hibino N., Morichi S. Simulation Analysis of Train Operation to Recover Knock-on Delay under High-Frequency / 13th WCTR, July 15-18, 2013 – Rio de Janeiro, Brazil. 14 p.
59. Müller-Hannemann, M. & Schnee, M. (2009) Efficient Timetable Information in the Presence of Delays (pp 249-272). In: Ahuja R.K., Möhring R.H., Zaroliagis C.D. (eds) *Robust and Online Large-Scale Optimization. Lecture Notes in Computer Science*, vol 5868. Springer, Berlin, Heidelberg.
60. Goverde R.M.P., Hansen I.A. Delay propagation and process management at railway stations. *5th World Conference on Railway Research (WCRR 2001): proceedings CD-ROM of the World Conference on Railway Research (WCRR 2001)*, Köln, November 25-29, 2001. Köln, 2001. P. 1-10
61. Goverde, R.M.P. A delay propagation algorithm for large-scale railway traffic networks. *Transportation Research Part C*. 2010. Vol.18. P.269-287. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.01.002>.
62. Matsiuk, V, Myronenko, V, Horoshko, V., Prokhorchenko, A., Hrushevska, T., Shcherbyna, R., ... Tymchenko, N. (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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.162143>.
63. Butko, T., Prokhorchenko, A., Golovko, T., & Prokhorchenko, G. Development of the method for modeling the propagation of delays in noncyclic train scheduling on the railroads with mixed traffic. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018. Vol.1/3(91). P. 30-39. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123141>.
64. Тишкин Е.М. Автоматизация разработки графика движения поездов. М.: Изд-во «Транспорт», 1974. 136 с.

65. Самарина Н.А. Составление двухпутного графика движения поездов на ЭВМ. М.: Изд-во «Транспорт», 1971. 124 с.
66. Самарина Н.А. Некоторые проблемы по совершенствованию алгоритмов и программ для составления графика движения поездов. *Труды МИИТ*. 1973, №. 449. С. 47-52.
67. Нестеренко Г. І., Пасічний О. М. Автоматизована розробка і побудова графіків руху поїздів. *Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2012. №3.С. 87-93.
68. Carey M., Kwieciński A. Stochastic approximation to the effects of headways on knock-on delays of trains. *Transportation Research Part B: Methodological*. 1994. Vol.28(4). P.251-267.
69. Şahin I., Markov chain model for delay distribution in train schedules: Assessing the effectiveness of time allowances. *J. Rail Transp. Planning Manage.* 2017. Vol. 7/ 3. P. 101-113.
70. Khadilkar H. Data-enabled stochastic modeling for evaluating schedule robustness of railway networks. *Transportation Science*. 2016. Vol. 51/ 4. P. 1161-1176. Doi:10.1287/trsc.2016.0703
71. Meester, L. E. & Muns, S. Stochastic delay propagation in railway networks and phasetype distributions. *Transportation Research Part B*. 2007. Vol.41. P.218-230. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2006.02.007>.
72. Zilko A.A., Kurowicka D., Goverde R.M.P. Modeling railway disruption lengths with copula bayesian networks. *Transp Res Part C Emerg Technol*. 2016. Vol.68. P.350-368.
73. Yuan, J. Goverde R. M. P., Hansen, I. A. Evaluating stochastic train process time distribution models on the basis of empirical detection data. *WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering*, Vol 40. 95-104.

74. Rößler D., Reisch J., Kliwer N. Modeling Delay Propagation and Transmission in Railway Networks. *14th International Conference on Wirtschaftsinformatik (WI2019)*, February 24-27, 2019, Siegen, Germany. 2019. 15p.
75. Berger, A., Gebhardt, A., Müller-Hannemann, M., & Lemnian, M. (2011). Stochastic delay prediction in large train networks. *In: 11th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems*, 100-111. <https://doi.org/10.4230/OASIcs.ATMOS.2011.100>.
76. Yuan, J. & Hansen, I. (2007). Optimizing capacity utilization of stations by estimating knock-on train delays. *Transportation Research Part B*, 41(2), 202–217. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2006.02.004>.
77. Barta, J. Rizzoli, A. E., Salani, M., & Gambardella, L. M.(2012). Statistical modelling of delays in a rail freight transportation network. *Proceedings - Winter Simulation Conference*, 1–12. <https://doi.org/10.1109/WSC.2012.6465188>.
78. Wiggeraad P., Alighting and boarding times of passengers at Dutch railway stations. TRAIL Res. School, Delft, The Netherlands, Tech. Rep., 2001. URL: <https://silo.tips/download/alighting-and-boarding-times-of-passengers-at-dutch-railway-stations> (дата звернення 20.11.2020).
79. Dekker, M. M., Panja, D., Dijkstra, H. A. & Dekker, S. C. Predicting transitions across macroscopic states for railway systems. *PLoS ONE*. 2019. Vol. 14. 6.
80. Buchmueller S., Weidmann U., Nash A. Development of a dwell time calculation model for timetable planning. *WIT Trans. Built Environ*. 2008. Vol. 103. P. 525-534. doi:10.2495/CR080511
81. Rößler, D., Reisch, J., & Kliwer, N. (2019). Modeling Delay Propagation and Transmission in Railway Networks. *14th International Conference on Wirtschaftsinformatik*, 15 p.
82. Wang, P. & Zhang. Train delay analysis and prediction based on big data fusion. *Transportation Safety and Environment*. 2019. 1(1), 79-88. <https://doi.org/10.1093/tse/tdy001>.

83. Graffagnino, T. Ensuring timetable stability with train traffic data. *Computers in Railways XIII WIT Transactions on The Built Environment*. 2012. 127, 427-438. <https://doi.org/10.2495/CR120361>.
84. Wada K., Akamatsu T., Osawa M. A control strategy to prevent propagating delays in high-frequency railway systems. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*. 2012. Vol.68/5. P. I_1025-I_1034. doi:10.2208/jscejipm.68.I_1025
85. Gorman, M. Statistical estimation of railroad congestion delay. *Transportation Research Part E Logistics and Transportation Rev.* 2009. 45(3), 446-456.
86. Wen, C., Huang, P., Li, Z., Lessan, J., Fu, L., Jiang, C., & Xu, X.(2019). Train Dispatching Management With Data-Driven Approaches: A Comprehensive Review and Appraisal. *A Comprehensive Review and Appraisal IEEE Access*, 7, 114547- 114571. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2935106>.
87. Oneto L, Fumeo E, Clerico G, Canepa R, Papa F, Dambra C, et al. Dynamic delay predictions for large-scale railway networks: Deep and shallow extreme learning machines tuned via thresholdout. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2017. Vol.47(10). P.2754-2767.
88. Nilsson R., Henning K. Predictions of train delays using machine learning. EXAMENSARBETE INOM DATATEKNIK, GRUNDNIVÅ, 15 HP STOCKHOLM. KTN. 2018. 52 p. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1217917/FULLTEXT01.pdf> (last accessed: 10 October 2019)
89. Landex, A. Network Effects In Railways. *WIT Transactions on The Built Environment*. 2012. 127, 391-401.
90. Pagani, A., Mosquera, G., Alturki, A., Johnson, S., Jarvis, S., Wilson, A., Guo, W. & Varga, L. Resilience or robustness: identifying topological vulnerabilities in rail networks. *Royal Society open science*. 2019. 6(2).1-16. <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.181301>.

91. Monechi, B., Gravino, P., & Di Clemente, R. . Complex delay dynamics on railway networks from universal laws to realistic modelling. *EPJ Data Science*. 2018. 7(35). doi:10.1140/epjds/s13688-018-0160-x
92. Baspinar, B., & Koyuncu. A Data-Driven Air Transportation Delay Propagation Model Using Epidemic Process Models. *International Journal of Aerospace Engineering* , 2016. 11. <https://doi.org/10.1155/2016/4836260>.
93. Dai, X., Hu, M., Tian, W., Xie, D., & Hu, B. Application of Epidemiology Model on Complex Networks in Propagation Dynamics of Airspace Congestion. *PLoS ONE*. 2016. 11(6). doi:10.1371/journal.pone.0157945
94. Manitz, J., Harbering, J., Schmidt, M., Kneib, T., & Schobel, A. Network-based Source Detection: From Infectious Disease Spreading to Train Delay Propagation. *Proceedings of the 29th International Workshop on Statistical Modelling, Georg-August-Universitat Gottingen, Germany, Part II: Contributed Papers I*. 2014. 201-205.
95. Frankhuizen, K., Li, Y., & Liu, H. Cascading Behavior of delay in Dutch Train Transportation: Network patterns and a model. 2018. Retrieved from <https://www.semanticscholar.org/paper/Cascading-Behavior-of-delay-in-Dutch-Train-%3A-and-a-Frankhuizen-Li/3a31366023f6626c5df52e6157aebddee8c54398>
96. Zeng, Z. & Li, T. Analyzing Congestion Propagation on Urban Rail Transit Oversaturated Conditions: A Framework Based on SIR Epidemic Model. *Urban Rail Transit*, 2018. 4(3),130–140.
97. Monechi B., Gravino P., Di Clemente R. and Servedio V. D. P. Complex delay dynamics on railway networks from universal laws to realistic modeling. *EPJ Data Science* 7 35 <https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-018-0160-x>
98. Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України ЦД-0036 затвердженої наказом Укрзалізниці від 14 березня 2001 р. № 143/Ц; навч.-метод. посіб. / О.Ф. Вергун, Н.В. Липовець, В.М. Боголій. К.: Транспорт України. 2002. 376 с.

99. UIC leaflet 406 R, Capacity. UIC International Union of Railways, France, 2e édition. Version traduite. List of recent publications. 2013. 60 p.
100. Diekmann O and Heesterbeek J A P, *Mathematical Epidemiology of Infectious Diseases*, John Wiley & Sons, Chisteter, UK, 2000.
101. Anderson, R. M., May, R. M. Population Biology of Infectious Diseases: Part I. *Nature*. 1979. 280. P. 361-367.
102. Правила технічної експлуатації залізниць України, затверджені наказом Міністерства транспорту України від 20.12.96 N 411, зареєстровані у Мін'юсті 25.02.97 за №50/1854 (зі змінами та доповненнями).
103. Інструкція з руху поїздів і маневрової роботи на метрополітенах України. Затверджено наказом Міністерства транспорту України 04.11.2003 № 854 (у редакції наказу Міністерства інфраструктури України від 07.11.2017 № 373). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0591-04#Text> (дата звернення 01.12.2020).
104. Watson, R. K. On an epidemic in a stratified population, *Journal of Applied Probability*. 1972. Vol. 9. P. 659-666.
105. Sivanandam S., Deepa S. Genetic Algorithm Implementation Using Matlab. In: Introduction to Genetic Algorithms. Springer, Berlin, Heidelberg. 2008.
106. Рутковская Д., Пилинський М., Рутковский Л.. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. Горячая линия-Телеком. 2006. 383 с.
107. Lee, M. Decision Making Approaches for Complex Adaptive Systems in Built Environment. *International Journal of Management and Applied Research*. 2017. Vol. 4.No. 4. P. 222-232. Doi:10.18646/2056.44.17-017
108. Loucks D.P., Beek E. van. Introduction to Optimization Models and Methods. Water Resource Systems Planning and Management. 2017. P. 93-177. Doi: 10.1007/978-3-319-44234-1_4
109. Hunt B R, Lipsman R L, Osborn J E, Rosenberg J M 2019 Differential Equations with Matlab, 3rd Edition 304 ISBN: 978-1-118-37680-5

110. Boyce, W.; DiPrima, R.; Meade, D. *Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems*. Wiley. 2017.
111. William H. Press, Brian P. Flannery, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling. *Numerical Recipes in C*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1988.
112. Spanos Aris *Probability Theory and Statistical Inference: Econometric Modeling with Observational Data*. University of Cyprus. 1999. 844 p.
113. Кушнір Н. Б., Кузнєцова Т. В. *Статистика : навч.-метод. посіб. для самостійного вивчення дисципліни*. НУВГП. 2008. 205 с.
114. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. *Генетические алгоритмы*. 2-е изд., ФИЗМАТЛИТ, 2006. 320 с.
115. Харари Ф. *Теория графов*. М.: Мир, 1973. 300 с.
116. Kermack, W. O., McKendrick, A. G. A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics. *Proc. Roy. Soc. Lond.* 1927. .A 115. P. 700-721.
117. Rushton, S. & Mautner, A. J. The deterministic model of a simple epidemic for more than one community, *Biometrika*, 1955. 42, 126–132.
118. Ball F.(1985). Deterministic and stochastic epidemics with several kinds of susceptibles. *Advances in applied probability*. 1985; p. 1–22.
119. Watson, R. K. On an epidemic in a stratified population, *Journal of Applied Probability*, 1972. vol. 9, pp. 659–666, 1972.
120. Valiente, G. *Algorithms on Trees and Graphs*. 2002. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 489 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04921-1>
121. Грунтов, П. С. *Эксплуатационная надежность станций*. М.: Транспорт. 1986. 247 с.
122. IEEE Std 493-1990: IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems.
123. Надійність техніки. Терміни та визначення: ДСТУ 2860-94.:чинний від 01.01.1996. К.: Держстандарт України, 1994. 33 с.

124. Теория игр и экономическое поведение. Дж. Фон Нейман, О. Моргенштерн. Перев. с англ. под ред. и с доб. Н.Н.Воробьева. Главная редакция физико-математической литературы, из-ва «Наука» 1970. 707 с.
125. Morton D. Davis, Game Theory: A Nontechnical Introduction, Dover Publications. 1997.
126. Жуковицький І.В., Скалозуб В.В., Устенко А.Б. Принципи побудови системи підтримки прийняття рішень і управління вантажними перевезеннями на основі аналітичних серверів АСК ВП УЗ. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2007. Вип. 17. С.28-34.
127. Пейсахзон, Б.Э. Вес и скорость грузовых поездов. Транспорт. 1957. 202 с.
128. Интеллектуальные транспортные системы железнодорожного транспорта (основы инновационных технологий): пособие / В. В. Скалозуб, В. П. Соловьев, И. В. Жуковицкий, К. В. Гончаров. – Д.: Изд-во Днепропетр. нац. ун-та ж.- д. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2013. 207 с.
129. Ивченко Ю.М., Ивченко В.Г., Гондар А.Н. Интеграция сетевого оборудования АСК ВП УЗ и АСК ПП УЗ, подключение его к ЕМПД. *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*. 2009. №29. С. 143-146.
130. Rotoli F., Navajas Cawood, E., Soria A. Capacity assessment of railway infrastructure: Tools, methodologies and policy relevance in the EU context; EUR 27835 EN. 2016. 62 p. doi:10.2791/037759
131. Нестеренко Г. І., Пасічний О. М. Автоматизована розробка і побудова графіків руху поїздів. *Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2012. №3. С. 87-93.
132. Гончаров М.М., Шпакович Р.А. Алгоритм побудови графіка руху поїздів *Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка"*. 2008. №.629. С. 146-152.

133. Інструкція користування програмним продуктом ГАС – „Railway”.
Державна адміністрація залізничного транспорту України. Львів. 2007.
134. Данько М.І. та ін. Мікропроцесорна диспетчерська централізація “КАСКАД” / Данько М.І., Мойсеєнко В.І., Рахматов В.З., Троценко В.І., Чепцов М.М.: Навч. посібник. Харків, 2005. 176 с.
135. Постанова Уряду Про реалізацію експериментального проекту щодо допуску приватних локомотивів до роботи окремими маршрутами на залізничних коліях загального користування, що затверджено постановою КМУ від 4 грудня 2019 р. № 1043. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1043-2019-%D0%BF#Text> (дата звернення 12.01.2020).
136. Тимчасового положення про порядок допуску приватних локомотивів до роботи окремими маршрутами на залізничних коліях загального користування, затверджено Міністерством інфраструктури України від 04.03.2020 р. наказ № 191. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0278-20#Text> (дата звернення 12.01.2020).
137. Правила перевезення вантажів (Наказ Міністерства транспорту України від 21 листопада 2000 року N 644, зареєстровано в Міністерстві юстиції України 24 листопада 2000 р. за N 861/5082) URL: https://uz.gov.ua/cargo_transportation/legal_documents/terms_of_freight/ (дата звернення 12.10.2020)
138. Балака Є.І., Зоріна О.І., Колесникова Н.М., Писаревський І.М. Оцінка економічної доцільності інвестицій в інноваційні проекти на транспорті: Навч. посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2005. 210 с.
139. Економіка залізничного транспорту: підручник / за ред. Ю. Ф. Кулаєва, Ю. С. Бараша, М. В. Гненного. Д: Дніпропетровський національний ун-т залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, 2014. 480 с.
140. Економіка транспорту: Навчальний посібник/ за заг. ред. М.В.Макаренка. К.: ДЕТУТ, 2014. 364с.

Додаток А

Порівняльний аналіз величин закладеного резерву часу у нормативному графіку руху поїздів з розрахунковими нормативами АТ Укрзалізниця та стандарту UIC 451-1 OR

Таблиця А.1 – Порівняльний аналіз закладеного резерву часу у нормативному ГРП для парних вантажних поїздів дільниці П-С з розрахунковим нормативом АТ УЗ та нормативом стандарту UIC 451-1 OR

Дільниця парний напрямок	Рух поїзда, хв	Відстань, км	Vсзв, км/год	Vрозн, км/год	Резерв фактичний, хв	Резерв за норм УЗ, хв	Резерв за норм UIC, хв	Різниця між норм резервів UIC та норм УЗ, хв	Різниця між УЗ норм та факт, хв	Різниця між норм UIC та факт, хв
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
П-С	138	93,8	40,20	43,63	2	4,26	5,52	1,26	2,26	3,52
П-С	133	93,8	41,69	45,02	0	3,93	5,32	1,39	3,93	5,32
П-С	138	93,8	40,20	43,63	3	4,23	5,52	1,29	1,23	2,52
П-С	133	93,8	41,69	45,02	0	3,96	5,32	1,36	3,96	5,32
П-С	135	93,8	41,08	44,31	0	4,05	5,4	1,35	4,05	5,40
П-С	175	93,8	31,80	34,32	0	5,13	7	1,87	5,13	7,00
П-С	152	93,8	36,55	39,36	0	4,45	6,08	1,63	4,45	6,08
П-С	182	93,8	30,59	32,91	4	5,59	7,28	1,69	1,59	3,28
П-С	136	93,8	40,78	43,97	1	4,11	5,44	1,33	3,11	4,44
П-С	147	93,8	37,77	40,78	0	4,32	5,88	1,56	4,32	5,88
П-С	152	93,8	36,55	39,36	2	4,62	6,08	1,46	2,62	4,08
П-С	150	93,8	37,03	39,91	0	4,44	6	1,56	4,44	6,00
П-С	135	93,8	41,08	44,31	0	4,05	5,4	1,35	4,05	5,40
П-С	142	93,8	39,08	42,32	7	4,48	5,68	1,20	-2,52	-1,32
П-С	157	93,8	35,40	38,29	0	4,72	6,28	1,56	4,72	6,28
П-С	153	93,8	36,31	39,08	0	4,59	6,12	1,53	4,59	6,12
П-С	181	93,8	30,75	33,11	0	5,34	7,24	1,90	5,34	7,24
П-С	154	93,8	36,08	38,81	0	4,51	6,16	1,65	4,51	6,16
П-С	158	93,8	35,18	38,03	1	4,77	6,32	1,55	3,77	5,32
П-С	156	93,8	35,62	38,55	0	4,62	6,24	1,62	4,62	6,24
П-С	167	93,8	33,30	35,85	4	5,13	6,68	1,55	1,13	2,68
П-С	153	93,8	36,31	39,08	0	4,53	6,12	1,59	4,53	6,12
П-С	142	93,8	39,08	42,32	7	4,48	5,68	1,20	-2,52	-1,32
П-С	142	93,8	39,08	42,32	8	4,52	5,68	1,16	-3,48	-2,32
П-С	133	93,8	41,69	45,02	0	3,93	5,32	1,39	3,93	5,32
П-С	351	93,8	15,94	17,05	0	10,43	14,04	3,61	10,43	14,04
П-С	144	93,8	38,55	41,69	0	4,17	5,76	1,59	4,17	5,76
П-С	144	93,8	38,55	41,69	0	4,09	5,76	1,67	4,09	5,76
Середнє					1,39	4,70	6,26	1,57	3,30	4,87

Таблиця А.2 – Порівняльний аналіз закладеного резерву часу у нормативному ГРП для непарних вантажних поїздів дільниці С-П з розрахунковим нормативом АТ УЗ та нормативом стандарту UIC 451-1 OR

Дільниця непарний напрямок	Рух поїзда, хв	Відстань, км	Vсзв, км/год	Vрозр, км/год	Резерв фактичний, хв	Резерв за норм УЗ, хв	Резерв за норм UIC, хв	Різниця між норм резервів UIC та норм УЗ, хв	Різниця між норм УЗ та факт, хв	Різниця між норм UIC та факт, хв
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
С-П	129	93,8	42,96	45,39	5	4,03	5,16	1,13	-0,97	0,16
С-П	127	93,8	43,63	45,39	3	3,90	5,08	1,18	0,90	2,08
С-П	121	93,8	45,76	49,37	7	3,85	4,84	0,99	-3,15	-2,16
С-П	125	93,8	44,31	48,94	10	4,08	5	0,92	-5,92	-5,00
С-П	130	93,8	42,64	46,13	8	4,15	5,2	1,05	-3,85	-2,80
С-П	141	93,8	39,36	41,69	6	4,42	5,64	1,22	-1,58	-0,36
С-П	112	93,8	49,37	55,18	10	3,69	4,48	0,79	-6,31	-5,52
С-П	150	93,8	37,03	37,52	0	4,50	6	1,50	4,50	6,00
С-П	149	93,8	37,27	41,69	14	4,93	5,96	1,03	-9,07	-8,04
С-П	172	93,8	32,34	33,90	6	5,35	6,88	1,53	-0,65	0,88
С-П	173	93,8	32,16	39,36	30	6,28	6,92	0,64	-23,72	-23,08
С-П	131	93,8	42,32	48,52	15	4,43	5,24	0,81	-10,57	-9,76
С-П	134	93,8	41,38	45,39	10	4,34	5,36	1,02	-5,66	-4,64
С-П	153	93,8	36,31	40,49	14	5,05	6,12	1,07	-8,95	-7,88
С-П	146	93,8	38,03	42,00	12	4,78	5,84	1,06	-7,22	-6,16
С-П	136	93,8	40,78	41,38	0	4,08	5,44	1,36	4,08	5,44
С-П	163	93,8	34,11	35,18	3	4,99	6,52	1,53	1,99	3,52
С-П	167	93,8	33,30	35,85	10	5,33	6,68	1,35	-4,67	-3,32
С-П	124	93,8	44,67	48,94	9	4,01	4,96	0,95	-4,99	-4,04
С-П	181	93,8	30,75	32,91	10	5,75	7,24	1,49	-4,25	-2,76
С-П	153	93,8	36,31	37,52	3	4,68	6,12	1,44	1,68	3,12
С-П	142	93,8	39,08	43,63	13	4,69	5,68	0,99	-8,31	-7,32
С-П	121	93,8	45,76	48,94	6	3,82	4,84	1,02	-2,18	-1,16
С-П	128	93,8	43,29	48,94	13	4,27	5,12	0,85	-8,73	-7,88
С-П	133	93,8	41,69	45,39	9	4,28	5,32	1,04	-4,72	-3,68
С-П	142	93,8	39,08	44,67	16	4,81	5,68	0,87	-11,19	-10,32
С-П	298	93,8	18,76	19,41	8	9,18	11,92	2,74	1,18	3,92
С-П	155	93,8	35,85	39,36	12	5,04	6,2	1,16	-6,96	-5,80
С-П	123	93,8	45,02	48,94	8	3,94	4,92	0,98	-4,06	-3,08
Середнє					9,31	4,71	5,87	1,16	-4,60	-3,44

Таблиця А.3 – Порівняльний аналіз закладеного резерву часу у нормативному ГРП для парних та непарних пасажирських поїздів з розрахунковим нормативом АТ УЗ та нормативом стандарту UIC 451-1 OR

Дільниця непарний напрям	Рух поїзда, хв	Відстань, км	Vсзв, км/год	Vрозр, км/год	Резерв фактичний, хв	Резерв за норм УЗ, хв	Резерв за норм UIC, хв	Різниця між норм резервів UIC та норм УЗ, хв	Різниця між норм УЗ та факт, хв	Різниця між норм UIC та факт, хв
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
В-С	82	89,8	62,65	69,08	4	5,42	4,35	-1,08	1,42	0,35
В-С	110	89,8	42,76	57,32	16	8,85	4,35	-4,50	-7,15	-11,65
В-С	91	89,8	53,88	65,71	9	6,66	4,35	-2,31	-2,34	-4,65
В-С	53,5	89,8	100,7	69,08	0	2,20	4,35	2,15	2,20	4,35
В-С	53,5	89,8	100,7	69,08	0	2,20	4,35	2,15	2,20	4,35
В-С	53,5	89,8	100,7	69,08	0	2,20	4,35	2,15	2,20	4,35
В-С	110	89,8	43,10	56,72	15	8,68	4,35	-4,34	-6,32	-10,65
С-В	129	93,8	40,78	46,90	9	8,90	4,41	-4,49	-0,10	-4,59
С-П	133	93,8	36,78	49,81	20	10,80	4,41	-6,40	-9,20	-15,59
С-В	94	89,8	48,98	69,08	16	7,95	4,35	-3,61	-8,05	-11,65
С-В	86	89,8	59,87	65,71	4	5,66	4,35	-1,32	1,66	0,35
С-В	88	89,8	57,32	65,71	6	6,05	4,35	-1,71	0,05	-1,65
С-В	54	89,8	99,78	69,08	0	2,24	4,35	2,10	2,24	4,35
С-В	53	89,8	101,7	69,08	0	2,16	4,35	2,19	2,16	4,35
С-П	76	93,8	74,05	62,53	0	3,85	4,41	0,56	3,85	4,41
С-В	53	89,8	101,7	69,08	0	2,16	4,35	2,19	2,16	4,35
С-В	91	89,8	53,88	65,71	9	6,66	4,35	-2,31	-2,34	-4,65
С-П	122	93,8	41,38	52,11	14	9,22	4,41	-4,81	-4,78	-9,59
С-П	145	93,8	35,62	42,64	13	10,41	4,41	-6,01	-2,59	-8,59
С-П	129	93,8	38,55	50,25	17	10,09	4,41	-5,68	-6,91	-12,59
П-С	116	93,8	45,39	52,11	8	7,99	4,41	-3,58	-0,01	-3,59
П-С	123	93,8	42,96	48,94	8	8,41	4,41	-4,00	0,41	-3,59
П-С	78	93,8	72,15	60,52	0	3,93	4,41	0,48	3,93	4,41
П-С	128	93,8	39,08	50,25	16	9,87	4,41	-5,47	-6,13	-11,59
П-С	148	93,8	35,85	40,49	9	10,03	4,41	-5,62	1,03	-4,59
П-С	126	93,8	41,38	48,52	10	8,86	4,41	-4,46	-1,14	-5,59
Середнє					7,81	6,60	4,37	-2,22	-1,21	-3,43

Таблиця А.4 – Порівняльний аналіз закладеного резерву часу у
нормативному ГРП для парних приміських поїздів з розрахунковим
нормативом АТ УЗ та нормативом стандарту UIC 451-1 OR

Дільниця непарний напрямок	Рух поїзд а, хв	Відс тань, км	Vсзв, км/год	Vрозр, км/год	Резерв фактич ний, хв	Резерв за норм УЗ, хв	Резерв за норм UIC, хв	Різниця між норм резервів UIC та норм УЗ, хв	Різниця між норм УЗ та факт, хв	Різниця між норм UIC та факт, хв
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
К-П	64	57,1	50,38	53,53	4	0,68	3,57	2,89	-3,32	-0,43
К-П	117	57,1	27,63	29,28	7	1,24	3,57	2,33	-5,76	-3,43
О-П	175	86,1	27,77	29,52	11	1,86	3,86	2,00	-9,14	-7,14
О-П	115	72,2	35,51	37,67	7	1,22	3,72	2,50	-5,78	-3,28
О-П	150	86,1	32,49	34,44	9	1,59	3,86	2,27	-7,41	-5,14
О-П	150	86,1	32,49	34,44	9	1,59	3,86	2,27	-7,41	-5,14
О-П	160	86,1	30,39	32,29	10	1,7	3,86	2,16	-8,3	-6,14
О-П	178	86,1	27,33	29,02	11	1,89	3,86	1,97	-9,11	-7,14
О-П	129	86,1	37,71	40,05	8	1,37	3,86	2,49	-6,63	-4,14
О-С	10	7,7	42,00	46,20	1	0,11	3,08	2,97	-0,89	2,08
О-С	10	7,7	42,00	46,20	1	0,11	3,08	2,97	-0,89	2,08
П-К	65	57,1	49,65	52,71	4	0,69	3,57	2,88	-3,31	-0,43
П-В	83	72,2	49,23	52,19	5	0,88	3,72	2,84	-4,12	-1,28
О-С	10	7,7	42,00	46,20	1	0,11	3,08	2,97	-0,89	2,08
П-О	183	86,1	26,63	28,23	11	1,94	3,86	1,92	-9,06	-7,14
П-К	128	57,1	25,19	26,77	8	1,36	3,57	2,21	-6,64	-4,43
О-С	12	7,7	35,54	38,50	1	0,13	3,08	2,95	-0,87	2,08
П-О	165	86,1	29,52	31,31	10	1,75	3,86	2,11	-8,25	-6,14
В-О	140	82,1	33,06	35,19	9	1,49	3,82	2,33	-7,51	-5,18
П-О	165	86,1	29,52	31,31	10	1,75	3,86	2,11	-8,25	-6,14
П-О	198	86,1	24,60	26,09	12	2,1	3,86	1,76	-9,9	-8,14
О-С	10	7,7	42,00	46,20	1	0,11	3,08	2,97	-0,89	2,08
П-О	165	86,1	29,52	31,31	10	1,75	3,86	2,11	-8,25	-6,14
О-С	9	7,7	46,20	51,33	1	0,1	3,08	2,98	-0,9	2,08
О-С	14	7,7	30,80	33,00	1	0,15	3,08	2,93	-0,85	2,08
О-С	10	7,7	42,00	46,20	1	0,11	3,08	2,97	-0,89	2,08
О-С	13	7,7	33,00	35,54	1	0,14	3,08	2,94	-0,86	2,08
О-С	10	7,7	42,00	46,20	1	0,11	3,08	2,97	-0,89	2,08
О-С	11	7,7	38,50	42,00	1	0,12	3,08	2,96	-0,88	2,08
О-С	12	7,7	35,54	38,50	1	0,13	3,08	2,95	-0,87	2,08
О-С	11	7,7	38,50	42,00	1	0,12	3,08	2,96	-0,88	2,08
Середнє					5,42	0,92	3,48	2,57	-4,50	-1,93

Таблиця А.5 – Порівняльний аналіз закладеного резерву часу у нормативному ГРП для непарних приміських поїздів з розрахунковим нормативом АТ УЗ та нормативом стандарту UIC 451-1 OR

Дільниця непарний напрямок	Рух поїзда, хв	Відстань, км	Vсзв, км/год	Vрозр, км/год	Резерв фактичний, хв	Резерв за норм УЗ, хв	Резерв за норм UIC, хв	Різниця між норм резервів UIC та норм УЗ, хв	Різниця між норм УЗ та факт, хв	Різниця між норм UIC та факт, хв
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
С-О	8	7,7	51,33	57,75	1	0,09	3,08	2,99	-0,91	2,08
С-О	11	7,7	38,50	42,00	1	0,12	3,08	2,96	-0,88	2,08
С-О	12	7,7	35,54	38,50	1	0,13	3,08	2,95	-0,87	2,08
С-О	9	7,7	46,20	51,33	1	0,1	3,08	2,98	-0,9	2,08
С-О	13	7,7	33,00	35,54	1	0,14	3,08	2,94	-0,86	2,08
С-О	11	7,7	38,50	42,00	1	0,12	3,08	2,96	-0,88	2,08
С-О	11	7,7	38,50	42,00	1	0,12	3,08	2,96	-0,88	2,08
С-О	22	7,7	19,25	21,00	2	0,24	3,08	2,84	-1,76	1,08
С-О	11	7,7	38,50	42,00	1	0,12	3,08	2,96	-0,88	2,08
С-О	11	7,7	38,50	42,00	1	0,12	3,08	2,96	-0,88	2,08
С-О	12	7,7	35,54	38,50	1	0,13	3,08	2,95	-0,87	2,08
С-О	11	7,7	38,50	42,00	1	0,12	3,08	2,96	-0,88	2,08
С-О	12	7,7	35,54	38,50	1	0,13	3,08	2,95	-0,87	2,08
Середнє						0,13	3,08	2,95	-0,95	2,00

Додаток Б

Програмна реалізація математичної моделі SIR з машинним навчанням

М-файл modelSIR.m дозволяє згенерувати первинні затримки:

```

clear all
global xx
global yy
global S_0
global I_0
global R_0
global t0
global y0
global IC
global tt0
global yy0
%           S I R
IC(:, :, 1)=[ 9 1 0
              4 0 0
              32 0 0];
IC(:, :, 2)=[ 10 0 0
              3 1 0
              32 0 0];
IC(:, :, 3)=[ 10 0 0
              4 0 0
              31 1 0];
xx(:, :, 1)=[0      6.016666667 7 14 19 24;
             0      6.016666667 7 14 19 24;
             0      0.016666667 5.816666667 6.166666667 9 24];
yy(:, :, 1)=[1 2 2 2 2 2;
             0 1 1 1 1 1;
             1 2 3 4 5 5];
xx(:, :, 2)=[0      0.016666667 0.216666667 13.33333333 15 24;
             0      0.016666667 0.216666667 13.33333333 15 24;
             0.2  0.3          5          13.33333333 15 24];
yy(:, :, 2)=[0 0 0 0 0 0 ;
             1 2 3 4 4 4 ;
             1 1 1 1 1 1];
xx(:, :, 3)=[0 0.016666667 0.216666667 13.33333333 15 24;
             0 3.45          4          10
             13.33333333 24;
             0 0.016666667 0.216666667 0.333333333
             0.533333333 24];
yy(:, :, 3)=[0 0 0 0 0 0 ;
             0 1 1 1 1 1 ;
             1 2 3 4 5 5];
%Відновлення команди ga з фінального попереднього запуску
програми
%'InitialPop', final_pop,

```

```

% відкоментувати для запуску з final_pop %початок
load final_pop_lub_v1
options = gaoptimset('InitialPopulation', final_pop);
options = gaoptimset(options, 'Generations', 200, ...
    'CrossoverFraction', 0.6, 'EliteCount', 20, ...
    'PopulationSize',
100, 'StallGenLimit', 100, 'Vectorized', 'off', 'PlotFcns', @gaplot
bestf);
% кінець

%====запуск без початкової популяції====
% options = gaoptimset('Generations', 200, ...
%     'CrossoverFraction', 0.6, 'EliteCount', 20, ...
%     'PopulationSize',
100, 'StallGenLimit', 100, 'Vectorized', 'off', 'PlotFcns', @gaplot
bestf);
%=====кінець=====
ub=zeros(1,12);
lb=zeros(1,12);
lb(1,1:9)=ones(1,9)*.0000000001;
ub(1,1:9)=ones(1,9)*2;
[params, C, reason, output, final_pop]=
ga(@objective,12,[],[],[],[],lb,ub,[],[],options)
C
%save final_pop_lub_v1 final_pop

for j=1:3
    figure();
    for i=1:3
        clr=[0 0 0];
        clr(i)=1;
        plot(tt0(:,j),yy0(:,3+i,j),'color',clr)
        hold on
        plot(xx(i,:,j),yy(i,:,j),'o-','MarkerEdgeColor',clr)
        end
        title(num2str(j));
        xlim([0 24]);
    end
    beta=reshape(params(1:9),[3,3]);

```

М-файл `objective.m`, що є фітнес функцією генетичного алгоритму для пошуку параметрів швидкості впливу поїздів різних категорій:

```

function [C] = objective(params)
global S_0
global I_0
global R_0
global xx

```

```

global yy
global t0
global y0
global IC
global tt0
global yy0
C=0;
for j=1:size(IC,3)
tt0=[];
yy0=[];
icon=reshape(IC(:,:,j),[1 9]);
[t0, y0] = solx2(params(1:9),params(10:12),icon);
tt0(:,j)=t0;
yy0(:,:,j)=y0;
yyy=zeros(size(xx(:,:,j)));
for i=1:3
y = interp1(t0,y0(:,3+i),(xx(i,:,j))');
yyy(i,:)=(y(:,:,1))';
end
n=size(yyy,2);
if yy(:,:,j)==0
err=(abs(yy(:,:,j)-floor(yyy)))./yy(:,:,j);
else
err=(abs(yy(:,:,j)-floor(yyy)))./n.*yy(:,:,j);
end
C=C+(sum(err.*100));%M.A.P.E...*1/n
end
num=size(IC,3);
C=1/54*sum(C);
params
end

```

М-файл `odesys.m` для розв'язку системи диференціальних рівнянь моделі

SIR:

```

function sirsys = odesys( x,beta,r,initial_values)

S(1) = x(1);
I(1) = x(4);
R(1) = x(7);
S(2) = x(2);
I(2) = x(5);
R(2) = x(8);
S(3) = x(3);
I(3) = x(6);
R(3) = x(9);
beta=reshape(beta,[3,3]);

```

```

beta=reshape(beta,[3,3]);
dS(1) = -(beta(1,1)* S(1) * I(1)+beta(1,2)* S(1) *
I(2)+beta(1,3)* S(1) * I(3)) ;
dI(1) = beta(1,1) * S(1) * I(1)+beta(1,2) * S(1) *
I(2)+beta(1,3) * S(1) * I(3)- r(1) * I(1);
dR(1) = r(1) * I(1);

dS(2) = -(beta(2,1)* S(2) * I(1)+beta(2,2)* S(2) *
I(2)+beta(2,3)* S(2) * I(3)) ;
dI(2) = (beta(2,1)* S(2) * I(1)+beta(2,2)* S(2) *
I(2)+beta(2,3)* S(2) * I(3))- r(2) * I(2);
dR(2) = r(2) * I(2);

dS(3) = -(beta(3,1)* S(3) * I(1)+beta(3,2)* S(3) *
I(2)+beta(3,3) * S(3) * I(3));
dI(3) = beta(3,1)* S(3) * I(1)+beta(3,2)* S(3) *
I(2)+beta(3,3) * S(3) * I(3)- r(3) * I(3);
dR(3) = r(3) * I(3);

sirsys = [dS(1); dS(2); dS(3); dI(1); dI(2); dI(3); dR(1);
dR(2); dR(3)];
end

```

М-файл solx2.m для розв'язку системи диференціальних рівнянь моделі

SIR:

```

function [t0, y0] = solx2(beta,r,initial_values)

[t, y] = ode23t(@(t, x) odesys( x,beta,r,initial_values)],[0
24],initial_values);
t0=t;
y0 = y;
end

```

М-файл ploter.m для візуалізації розв'язку системи диференціальних рівнянь моделі SIR:

```

for j=1:3
    figure(1);
    s(j) = subplot(3,1,j); % top subplot

    hold on
    %=====
    icon=reshape(IC(:,:,j),[1 9]);
    [t0, y0] = solx2(params(1:9),params(10:12),icon);
    yyy=zeros(size(xx(:,:,j)));

    for i=1:3

```

```

y = interp1(t0,y0(:,3+i),(xx(i,:,j))');
yyy(i,:)=(y(:, :,1))';
end
%=====
for i=1:3
clr=[0 0 0];
clr(i)=1;
plot(xx(i,:,j),yyy(i,:), 'Linewidth',2, 'color',clr)
hold on
plot(xx(i,:,j),yy(i,:,j), 'o-', 'MarkerEdgeColor',clr)
end
ylabel('delay trains','FontSize',14)
xlim([0 24]);
end
    title(s(1), 'passanger trains')
    title(s(2), 'community trains')
    title(s(3), 'freight trains')
    xlabel('time', 'FontSize',14)

%====BOX диаграмма
figure(2);
for j=1:3
    f(j) = subplot(3,1,j);
    hold on
%=====
icon=reshape(IC(:, :,j), [1 9]);
[t0, y0] = solx2(params(1:9),params(10:12),icon);
yyy=zeros(size(xx(:, :,j)));
for i=1:3
y = interp1(t0,y0(:,3+i),(xx(i,:,j))');
yyy(i,:)=(y(:, :,1))';
end
%=====
for i=1:3
clr=[0 0 0];
clr(i)=1;
n=size(yyy,2);
box3(i,:)=yy(i,:,j)-yyy(i,:);% M.A.P.E.
box3Fishbox3(i,:)=[yy(i,:,j) yyy(i,:)]
end
boxplot(box3',{'passanger trains','community trains',
'freight trains'});
ylabel('error','FontSize',14)
hold on
end
    title(f(1), 'delay passanger trains')

```

Додаток В

Програмна реалізація математичної моделі розповсюдження затримок на графі залізничної мережі

Основний m-файл networkdelays.m для запуску вхідних баз даних та розв'язання математичної моделі розрахунку графіка руху поїздів на дільниці за допомогою алгоритму бджолиних колоній:

```
clear all; clc; close all
tic
starttime=[    0 %1
              24 %2
              24 %3
              48 %4
              48 %5
              72 %6
              72 %7
              72 %8
]

load beta
load r

s = [1 2 3 3 4 5 2 4];
t = [2 3 5 4 5 6 7 8];

%затримані %0-cargo    1-pas    2-comun
jets=[  4  0  1      8    0
       20 0  1      6    0
        6 0  1      7    0
        4 0  3      6    0
        4 0  3      4    0
        2 0  4      8    0
        5 0  5      6    0
       14 0  4      5    0
        7 1  1      8    0
        5 1  1      6    0
        7 1  1      7    0
       12 1  3      8    0
       12 1  3      6    0
       15 1  4      6    0
        6 2  1      7    0
        6 2  1      3    0
        4 2  3      5    0
        3 2  5      6    0
        6 2  4      5    0
```

```

        12 2 1      2      0
    ];

jt=jets(:,3:end);
jt2=jets(:,1:2);
sir=cell(size(s,2),1)
for i=1:size(sir,1)
sir{i}=zeros(3)
end
    %cargo %pas %com
sir{1}=[25 15 28 %S
        5 4 0 %I
        0 0 0] %R
global st
st=[80 80 %1
    60 70 %2
    50 45 %3
    10 50 %4
    40 15 %5
    35 5 %6
    55 82 %7
    -10 55 %8
    ];
im=(vertcat(s,t))'
chess=zeros(size(st,1))
for i=1:size(jt,1)
    chess(jt(i,1), jt(i,2))=jt2(i,1);
end
global am
am=zeros(size(st,1),size(st,1)); % ajacency matrix
global A
A=zeros(size(st,1),size(st,1)); % weighted ajacency matrix
of lengths
for j=1:size(im,1)
    am(im(j,1),im(j,2))=j;
    am(im(j,2),im(j,1))=-j;
    d=dist(vertcat(st(im(j,1),:),st(im(j,2),:))');
    A(im(j,1),im(j,2))=d(1,2);
    A(im(j,2),im(j,1))=d(1,2);
end
figure('Name','Залізничний полігон','NumberTitle','off')
h=axes('XLim',[-20 100],'YLim',[0
100],'Position',[0.01,0.01,0.99,0.99],'DataAspectRatio',[1 1
1]);
axis off
for a=1:size(im,1)
    line([st(im(a,1),1) st(im(a,2),1)],[st(im(a,1),2)
st(im(a,2),2)],'LineWidth',3,'Color','k')
    hold on

```



```

    'VariableNames',{'EndNodes' 'Beta' 'r' 'StartTime'})
NodeTable = table(station,'VariableNames',{'Station'})
G = digraph(EdgeTable,NodeTable);
figure()
h=plot(G,'NodeLabel',G.Nodes.Station,'EdgeLabel',starttime)
set(gca,'visible','off')
d = distances(G,'Method','unweighted')
uu=h.YData
ux=horzcat(uu',(1:size(G.Nodes,1))')
ux2=sortrows(ux,1,'descend')
ux3=ux2(:,2)
ux4=[]
eh=[]
for i=1:size(ux3,1)
    fn=find(s==ux3(i))
    if ~isempty(fn)
        eh{end+1}=fn
    end
end
im=full(incidence(G))
InflowingEdges={}
issource=1
for i=1:size(im,1)
InflowingEdges{i} = predecessors(G,i)
end
InflowingEdges=[];
eh=[];
eh={ [1] [2 3] [4 5] [6 7] [8] };
InflowingEdges={ [] [1] [2] [2] [4] [3] [1] [4] };
EdgeTable.StartTime = [0 24 48 48 72 72 24 72]';
sm={};
for i=1:size(eh,2)
    hhx=eh{i}
    for j=1:size(hhx,2)
        hb=hhx(j);
        ssc=sir{hb};
        S_0=ssc(1,:);
        I_0=ssc(2,:);
        R_0=ssc(3,:);
        ie=InflowingEdges{hb}
        if ~isempty(ie)
            for o=1:3
                sc=zeros(1,3);
                for k=1:size(ie,1)
                    if spj(ie(k),o)>0
                        cc=sm{ie(k)};
                        jjspc=jt2sp{hb};%струмені через поточну ділянку
                        jjsp=jt2sp{ie(k)};%струмені через вхідну ділянку
                    end
                end
            end
        end
    end
end
smm=0;

```

```

        for ww=1:size(jjsp,2)
            if (jets(jjsp(ww),2)==(o-1)) &
find(jjspc==jjsp(ww),1,'first')
                smm=smm+jets(jjsp(ww),1);
            end
        end
        for ww=1:size(jjspc,2)
            if (jets(jjspc(ww),2)==(o-1)) &
jets(jjspc(ww),3)==s(hb)
                smm=smm+jets(jjspc(ww),1);
            end
        end
quotient=smm/spj(ie(k),o)
sc=sc+cc(find(cc(:,10)==EdgeTable.StartTime(hb),1,'first'),[o
o+3 o+6])*quotient;
        end
    end
    if issource==1
        S_0(o)=sc(1);
        I_0(o)=sc(2);
        R_0(o)=sc(3);
    issource=0;
    else
        S_0(o)=sc(1)+sc(3);
        I_0(o)=sc(2);
        R_0(o)=0;
    end
end
end
end
[t0, y0] = solx2(EdgeTable.Beta(hb,:),EdgeTable.r(hb,:),[S_0,
I_0, R_0])
t0=t0+EdgeTable.StartTime(hb)
if t0(1)>0
    t00=(0:(t0(1)-1))';
    sn= zeros(size(t00,1),9)
    sn(:,1)= sum(y0(1,:))
    sn=horzcat(sn,t00);
    sm{hb}=vertcat(sn,horzcat(y0,t0'));
else
    sm{hb}=horzcat(y0,t0');
end
end
end
figure()
tint=120
ttl={'cargo'
    'passenger'
    'commuter'
}

```

```

    for j=1:3
    ssx=zeros(tint,3);
    for i=1:size(sm,2)
    ssx=ssx+sm{i}(1:tint,[j j+3 j+6]);
    end
    subplot(3,1,j);
    plot(0:1:(tint-1), ssx(1:tint,1));
    hold on
    plot(0:1:(tint-1), ssx(1:tint,2));
    hold on
    plot(0:1:(tint-1), ssx(1:tint,3));
    legend({'S' 'I' 'R'})
    title(ttl{j})
    end
    table0=[]
    table24=[]
    figure()
    for j=1:3
    for i=1:size(EdgeTable,1)
        subplot(size(EdgeTable,1),3,j+(i-1)*3);
        ssx=zeros(tint,3);
    ssx=sm{i}(1:tint,[j j+3 j+6]);
    table0(:,j,i)=(ssx(1,:))';
    table24(:,j,i)=(ssx(end,:))';
    plot(0:1:(tint-1), ssx(1:tint,1));
    hold on
    plot(0:1:(tint-1), ssx(1:tint,2));%'r');
    hold on
    plot(0:1:(tint-1), ssx(1:tint,3));%'b'
    if i==1
    title({upper(ttl{j}),string([strcat(station(EdgeTable.EndNodes(i,1)),station(EdgeTable.EndNodes(i,2))])})}
    else
    title(cellstr(strcat(station(EdgeTable.EndNodes(i,1)),station(EdgeTable.EndNodes(i,2)))))
    end
    end
    end
    X=[]
    for i=1:size(table0,3)
        X=vertcat( X, horzcat( strcat(station(s(i)),'-
',station(t(i)) ) , ' ',' ',' ' ) )
        X=vertcat( X, horzcat(['S(0)';'I(0)';'R(0)'] , string(
table0(:, :, i)) ))
        X=vertcat( X, horzcat(['S(24)';'I(24)';'R(24)'] ,
string( table24(:, :, i)) ))
    end
    X=vertcat( [ "states" "passenger" "commuter" "cargo" ]
, X )

```

```
writetable(table(X), 'xxx.xls', 'Sheet', 'data');
toc
```

М-файл візуалізації розв'язку:

```
function plotjet22(P,w,ttype)
global st
c=st(P,:);
r=1+rand()*11;
c=vertcat(2*c(1,:)-c(2,:),c,2*c(size(c,1),:)-c(size(c,1)-
1,:));
x=zeros(1,2);
    for q=2:(size(P,2)+1)
        k=c(q-1,:);
        l=c(q,:);% middle point
        m=c(q+1,:);
        ank=angle((-l(1,2)+k(1,2))*1i+(-l(1,1)+k(1,1)));
        anm=angle((-l(1,2)+m(1,2))*1i+(-l(1,1)+m(1,1)));
        an=(ank+anm)/2+pi/2;
        if q==2
            anxx=an;
        end
        k=abs(sec(abs((0.5*(pi+ank-anm)))))*sign(-ank+anm);
        x=vertcat([cos(an+0.5*pi)*r*k+l(1)
sin(an+0.5*pi)*r*k+l(2)],x,[cos(an-0.5*pi)*r*k+l(1) sin(an-
0.5*pi)*r*k+l(2)]);
        end
x(q,:)=[];
h=3;
xpl=[cos(an+pi/18) sin(an+pi/18)]*sign(ank-anm)*h;
xpr=[cos(an-pi/18) sin(an-pi/18)]*sign(ank-anm)*h;
x=vertcat(x(1,:),x(1,)+xpr,x(1,)+xpl,x(x(size(x,1),:)+xpl,x
(size(x,1),:)+xpr,x(size(x,1),:));
xy=horzcat(flipdim(x(1:size(x,1)/2,:),1),x(size(x,1)/2+1:size
(x,1),:));
b=2*round(rand());
cl=[0.4 0 0];
    switch ttype
        case 1
            cl(1)=1;
        case 2
            cl(2)=1;
        otherwise
            cl(3)=1;
    end
line(xy(:,1+b),xy(:,2+b),'LineWidth',1.5,'Color',cl);
dd=.4;
rectangle('Position',[xy(1,1+b)-dd xy(1,2+b)-dd 2*dd
2*dd],'Curvature',1,'FaceColor',cl,'EdgeColor',cl)
```

```

if ~ischar(w)
w=num2str(w);
end
anxx=anxx+pi/2;
R = [cos(anxx) -sin(anxx); sin(anxx) cos(anxx)];
centr=(xy(1,(1+b):(2+b))+xy(2,(1+b):(2+b)))*0.5
centrx= repmat(centr,4,1)
d=1;
h=7;
xx=[centr(1)-d;centr(1)+d;centr(1)+d;centr(1)-d];
yy=[centr(2)-h;centr(2)-h;centr(2)+h;centr(2)+h];
v=[xx yy];
v=v';
vo = R*(v - centrx') + centrx'

wo(1,:)=[mean([vo(1,1) vo(1,2)]) mean([vo(1,2) vo(1,3)])
mean([vo(1,3) vo(1,4)]) mean([vo(1,4) vo(1,1)])];
wo(2,:)=[mean([vo(2,1) vo(2,2)]) mean([vo(2,2) vo(2,3)])
mean([vo(2,3) vo(2,4)]) mean([vo(2,4) vo(2,1)])];
switch ttype
case 1
    ttp='pas';
case 2
    ttp='com' ;
otherwise
    ttp='car' ;
end
txt=[ttp,' ',w,' '];
text(centr(1),centr(2),txt,'HorizontalAlignment','center','Ve
rticalAlignment','middle','FontName','arial
narrow','FontSize',14,'Color',cl,'rotation',(anxx-
pi/2)*180/pi);
end

```

Додаток Г

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Основні наукові праці:

Публікації у 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. № 169.С. 205-213. (видання індексується у базі *Index Copernicus, OUCI, DOIJ*).

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 у 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 у 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-я 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 одноколіїній залізничній дільниці. *Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність на транспорті». Секції 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, Х.: Технологічний Центр, 2020. С.56. e-ISBN 978-617-7319-29-9

Відомості про апробацію результатів дисертації

1. 75 студентська науково-технічна конференція (м. Харків, 13-15 листопада 2013 р.) (особиста участь).

2. International Scientific Conference on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies. BulTrans-2020 (10th-13th September 2020, Technical University of Sofia, Sozopol, Bulgaria) (особиста участь).

3. 33-я міжнародна науково-практична конференція «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (м. Харків, 30 жовтня 2020 р.) (особиста участь).

4. VII міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту» (м. Кременчук, 11-13 листопада 2020 р.) (заочна участь).

5. Міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні технології управління транспортними процесами» (м. Харків, 17-18 листопада 2020 р.) (особиста участь).

6. Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність на транспорті» (м. Харків, 18-20 листопада 2020 р.) (особиста участь).

7. IX наукова конференція «Наукові підсумки 2020 року» (особиста участь).

Додаток Д
Акти впровадження

ЗАТВЕРДЖЕНО

Проректор з науково-педагогічної роботи
Українського державного університету
залізничного транспорту, к.т.н., доцент

Дмитро Мкртчян

“ 10 ” 2020 р.

АКТ

**про впровадження результатів дисертаційної роботи
Гуріна Дмитра Олеговича щодо удосконалення методу визначення
величин резервів часу у графіку руху поїздів на основі моделювання
поширення затримок поїздів у навчальному процесі
Українського державного університету залізничного транспорту**

Основні результати дисертаційної роботи Гуріна Д.О. впроваджено у навчальний процес Українського державного університету залізничного транспорту на факультеті “Управління процесами перевезень” кафедри “Управління експлуатаційною роботою” у дисципліні “Управління експлуатаційною роботою” в змістовному модулі “Графік руху поїздів та пропускна спроможність” при вивченні удосконалених методів визначення резервів часу у нитках графіку для залізничних мереж без дотримання розкладу руху, до яких відноситься залізнична мережа України, зокрема:

- метод пошуку раціонального резерву часу на відновлення руху поїздів різних категорій в залежності від кількості затриманих поїздів на залізничній ділянці на основі модифікованої SIR-моделі для вивчення процесу розповсюдження затримок поїздів на залізничній лінії з урахуванням взаємовпливу поїздів різних категорій та величини їх резерву часу.

- метод прогнозування поширення затримок поїздів на розгалужених залізничних полігонах, що базується на графі взаємопов'язаних SIR-моделей для вивчення взаємовпливів поїздів з різним пріоритетом в потоці та “мережевого ефекту”.

Дані розробки використовуються при підготовці магістрів освітньо-професійного та освітньо-наукового рівнів на факультеті “Управління процесами перевезень” за освітніми програмами “Організація перевезень і управління на транспорті” спеціальності 275.02 – “Транспортні технології (на залізничному транспорті)”.

Декан факультету
“Управління процесами перевезень”
УкрДУЗТ, к.т.н., доцент

Максим Куценко

ЗАТВЕРДЖЕНО

Перший заступник директора регіональної
філії "Південна залізниця"
АТ «Укрзалізниця»


М.В. Кузьменко
"18" "12" 2020 р.

АКТ

**про впровадження результатів дисертаційної роботи
Гуріна Дмитра Олеговича щодо удосконалення процедури визначення
величин резервів часу у графіку руху поїздів на основі моделювання
поширення затримок поїздів на полігонах регіональної філії "Південна
залізниця"**

До основних результатів дисертаційної роботи Гуріна Д.О., що експериментально були впроваджені при складанні нормативних графіків руху та проведенні аналізів щодо надійності діючих графіків руху на регіональній філії "Південна залізниця", належать:

- метод пошуку раціонального резерву часу на відновлення руху поїздів різних категорій в залежності від кількості затриманих поїздів на залізничній дільниці, що дозволяє на основі модифікованої SIR-моделі провести моделювання розповсюдження затримок поїздів на залізничній лінії з урахуванням взаємовпливу поїздів різних категорій та величини їх резерву часу;

- метод прогнозування поширення затримок поїздів на розгалужених залізничних полігонах, що базується на графі взаємопов'язаних SIR-моделей, які враховують взаємовплив поїздів з різним пріоритетом в потоці. Даний метод в межах автоматизації розрахунків дозволив з прийнятною швидкістю та точністю прискорити розрахунки для прогнозування наслідків поширення збоїв в розкладах руху поїздів з урахуванням "мережевого ефекту".

Впровадження зазначених результатів надало можливість визначити раціональні величини компенсаційного резерву часу в нитках графіка поїздів різних категорій. Підвищити якість складання графіку руху поїздів на регіональній філії "Південна залізниця", що, як наслідок, надало можливість підвищити ефективність використання пропускнуої спроможності залізничних дільниць, збільшити дільничну швидкість та зменшити час затримок поїздів біля світлофорів. Отримані результати дозволяють підвищити середню дільничну швидкість поїздів до 2% від існуючої.

Члени комісії:

Начальник структурного підрозділу
«Регіональний центр управління рухом»
регіональної філії «Південна залізниця»
АТ «Укрзалізниця»

Заступник начальника
регіонального центру управління рухом



Д.А.Шварьов

О.А.Немовча