

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 макrorівні 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 слідує за графіком але потенційно можуть бути затримані при русі на дільниці (англ., *Susceptible*); поїзди, що слідує із затримкою та впливають на слідування інших поїздів, передаючи їм затримку (англ., *Infected*); поїзди, що за час слідування через залізничну дільницю з затримкою, поглинули її (виконали нагін), слідує за графіком, та не впливають на виникнення затримок в подальшому русі (англ., *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. VIII 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 проекту щодо допуску приватних локомотивів до роботи окремими маршрутами на залізничних коліях загального користування» і виконання зобов'язань України щодо лібералізації залізничного ринку згідно з Угодою про асоціацію між Україною, з однієї сторони, і Європейським Союзом, Європейським Співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони. У межах стратегії впровадження в Україні покращення швидкості та передбачуваності руху поїздів важливим є розроблення методів підвищення надійності графіка руху поїздів. Графік руху поїздів (ГРП) є одним з важливих нормативних планів, що визначає пунктуальність, надійність і характеризує ефективність роботи залізничної системи. Залізнична система України працює без встановленого графіка руху вантажних поїздів і має досить ненадійний рівень надання послуг з перевезення. За таких умов актуальним є закладання раціонального резерву часу в графік руху поїздів для дотримання точності та пунктуальності його виконання.

Діючі процедури складання графіка руху поїздів для залізничної мережі України не передбачають його дослідження на стійкість і надійність при різних варіантах затримок поїздів. Це призводить до збоїв в експлуатації, зменшення

дільничної швидкості поїздів і неможливості зменшення впливу таких збоїв на загальну систему руху. Для можливості уникнення каскадів затримок поїздів важливо закладати у графік руху поїздів резерви часу, що є компенсаційним часом у нитці графіка для можливості прискорення руху поїзда та здійснення операції – нагін для введення поїзда, що запізнювався, у графік руху та зменшення впливу затримки на інші поїзди. Для виключення зазначених вище недоліків необхідним є удосконалення методів визначення резервів часу в нитках графіка на основі проведення автоматизованих розрахунків щодо прогнозування затримок поїздів у мережі з урахуванням закладених резервів часу та на основі отриманих результатів коригувати нормативний ГРП до його введення в дію.

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

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась відповідно до 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.

## 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. *VIII 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 одноколіійній залізничній дільниці. *Міжнародна науково-*

- технічна конференція «Енергоефективність на транспорті». Секція 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](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](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](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-ukrzaliznytszeu-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](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](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. *Trafikdagepå 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](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. *traffIT solutions and VIA Consulting & Development*. URL: [http://www.ontime-rail.com/index\\_en.html](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](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. Wiggenraad 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., Кузнецова 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/](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.: ДЕГУТ, 2014. 364с.