

Український державний університет залізничного транспорту
Міністерство освіти і науки України

Український державний університет залізничного транспорту
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ТАРАСОВ КИРИЛО ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 656.224

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В
УМОВАХ ПОШКОДЖЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

275 – транспортні технології

27 – транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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



К.О. Тарасов

Науковий керівник

ПРИМАЧЕНКО Ганна Олександрівна,
к.т.н, доцент

Харків – 2025

АНОТАЦІЯ

Тарасов К.О. Удосконалення організації пасажирських перевезень в умовах пошкодження залізничної інфраструктури – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275 – Транспортні технології. – Український державний університет залізничного транспорту, МОН України, Харків, 2025.

Дисертацію присвячено вирішенню наукового завдання удосконалення організації пасажирських перевезень в умовах пошкодження залізничної інфраструктури із можливим задіянням додаткових «поїздів-шаттлів» та автомобільного транспорту. Такий підхід сприятиме підвищенню рівня надійності та конкурентоспроможності залізничного транспорту при перевезенні пасажирів за рахунок мінімізації додаткових експлуатаційних витрат порівняно з експлуатаційними витратами на штатне графікове перевезення

У *вступі* доведено актуальність обраної теми, наведено загальну характеристику роботи, особистий внесок здобувача та апробацію результатів дослідження, показано зв'язок роботи з науковими темами та програмами, сформовано мету, задачі, об'єкт та предмет дослідження, викладено методи досліджень та положення наукової новизни, обґрунтовано практичне значення отриманих результатів.

У *першому* розділі було проведено аналіз стану та розвитку залізничних пасажирських перевезень, який показав, що на сьогоднішній день, пасажирські перевезення в Україні забезпечуються лише автомобільним та залізничним транспортом. Встановлено, що українська залізнична мережа є значущим компонентом транспортної інфраструктури країни, виконуючи важливу роль у забезпеченні пасажирських перевезень на різних рівнях: дальнього, регіонального і частково приміського сполучення. Зокрема, система залізничних перевезень стала критично важливою після подій з 24 лютого 2022 року, коли зміни в транспортній системі відбулися внаслідок конфлікту. Пасажирський залізничний транспорт не

лише забезпечує зручний доступ до різних регіонів країни, але також відіграє важливу роль у транспортуванні поранених, евакуації мирного населення та перевезенні високопоставлених осіб. В цей непростий час залізниця виявилася надійним і важливим засобом для забезпечення мобільності та безпеки громадян. На сьогоднішній день в Україні всі залізничні перевезення проводяться єдиним оператором АТ УЗ, в якому безпосередньо за організацію пасажирських перевезень відповідають філії ПК та УЗШК.

Проведено аналіз основних показників поїздів категорії Intercity, а також дальнього та регіонального сполучення показав, який показав, що кількість перевезених пасажирів під час військового стану скоротилася порівняно з попередніми роками, але залишалася на досить високому рівні, а також досягла рекордних показників у напрямку до країн ЄС. Згідно з графічними аналізами, зміни в пасажиропотоці та рівні населеності пасажирських поїздів були відзначені, проте залізниця зуміла адаптуватися та відновити певну стабільність до кінця звітної періоду. Це свідчить про високий рівень організаційної та технічної підготовленості залізничного транспорту України навіть у надзвичайних умовах.

Проведений аналіз причин пошкодження залізничної інфраструктури засвідчив, що кожна з них має специфічний характер впливу на стабільність перевізного процесу. Виявлено, що основними чинниками пошкоджень є природні катаклізми, транспортні події та військові дії, кожен із яких має власні особливості виникнення та масштаби наслідків. Особливу загрозу для залізничної мережі в сучасних умовах становлять бойові дії, які відповідно до проведеного відсоткового аналізу є причиною понад 53% усіх випадків пошкодження інфраструктури. Отримані результати показали, що при плануванні та організації пасажирських перевезень необхідно також враховувати ризики пошкодження інфраструктури

У другому розділі було встановлено, що зважаючи на динамічність політичних, соціальних та економічних змін, прогнозування пасажиропотоків на графікових зупинках стає критично важливим для раціонального планування та організації пасажирського руху. Актуальні умови ринкової економіки вимагають від пасажирських перевізників постійної адаптації, впровадження нових технологій і

методів організації перевезень. Враховуючи складність та нелінійність пасажиропотоків, особливо з урахуванням їх сезонних коливань, необхідно використовувати методики, що враховують нечіткість вхідної інформації та забезпечують швидку адаптацію до змін. Тому, зважаючи на високу точність, здатність автоматично виявляти ознаки, ефективну роботу з великими обсягами даних, гнучкість і можливість тестування сценаріїв, для прогнозування пасажиропотоків у сучасному складному і динамічному середовищі було обрано апарат нейронних мереж.

Також, було проведено аналіз пасажиропотоків за 2022 рік по напрямкам, який показав, що найбільш затребуваним напрямком став Львівський, що пов'язано з евакуацією населення через бойові дії. Встановлено, що швидкісні поїзди категорії Intercity+ залишаються найбільш привабливими для пасажирів завдяки меншому часу в дорозі, вищому рівню комфорту та надійності перевезень, що є особливо важливим як для ділових подорожей, так і туристичних поїздок. Тому, модель прогнозування пасажиропотоків для поїздів цієї категорії було побудовано на прикладі поїзда №715 сполученням Київ-Перемишль, який виявився найпопулярнішим серед пасажирів.

У результаті формування моделі на основі нейронних мереж для прогнозування пасажиропотоку по станції Вінниці, для поїзда №715, було досягнуто заданої точності з похибкою до 6%. Це свідчить про ефективність використання нейронних мереж у прогнозуванні пасажирських потоків. Отримана модель дозволяє з високою достовірністю передбачати кількість пасажирів, які скористаються поїздом на вказаному маршруті. Застосування такої моделі дозволить забезпечувати більш точне та ефективне планування перевезень, що сприятиме оптимізації роботи залізничного транспорту.

У *третьому* розділі в межах проведеного дослідження розроблено комплексний метод оцінки ризику затримки пасажирських поїздів, який враховує імовірнісні характеристики виникнення пошкоджень залізничної інфраструктури під дією різних факторів ризику. Встановлено, що основними причинами пошкоджень є природні катаклізми, транспортні події та бойові дії. Для кожного фактора окремо розраховано індивідуальні ймовірності пошкодження залізничних дільниць, а також

запропоновано механізм їх динамічного об'єднання в загальну ймовірність із урахуванням змін у структурі пошкоджень у часі.

Розроблена модель динамічного оновлення ваг дозволяє адаптивно реагувати на зміни зовнішніх умов, підвищуючи достовірність прогнозування потенційних загроз для залізничної мережі. Визначено, що ризик затримки пасажирських поїздів розраховується як добуток сумарної ймовірності пошкодження та математичного очікування величини затримки, що апроксимується нормальним законом розподілу за статистичними даними.

Обраний напрямок Київ-Львів було представлено у вигляді зваженого графу, де вершини представляють основні залізничні станції, а ребра – залізничні дільниці з вагами у вигляді часу на подолання кожної дільниці, наявності електрифікації та пропускної спроможності. Така модель дозволяє більш точно оцінювати час прямування поїздів і експлуатаційні витрати, що є важливим для формування альтернативних маршрутів. Встановлено, що застосування «поїздів-шаттлів» та автомобільного транспорту для підвозу пасажирів у випадку пошкодження інфраструктури або проведення ремонтних робіт забезпечує гнучкість і ефективність транспортної системи. Це дає можливість швидко реагувати на непередбачувані ситуації та підтримувати високий рівень обслуговування пасажирів.

Було запропоновано оптимізаційна математична модель з цільовою функцією мінімізації підвищення експлуатаційних витрат (порівняно зі штатними витратами), яка дозволяє ефективно вирішувати цю задачу. Модель враховує витрати на прямування альтернативним маршрутом, використання «поїздів-шаттлів» та автобусного транспорту, а також додаткові простої поїздів. Введення булевих змінних та інших параметрів у цільову функцію дозволяє гнучко моделювати різні сценарії та умови перевезень, забезпечуючи точність і надійність результатів. Завдяки використанню даної математичної моделі можна оперативно визначати оптимальні альтернативні маршрути у випадку надзвичайних ситуацій, що дозволяє мінімізувати час простою, зменшити експлуатаційні витрати та забезпечити своєчасне прибуття пасажирів до місця призначення. Це сприяє підвищенню ефективності управління залізничною мережею, забезпеченню її надійності та адаптивності до

непередбачуваних умов, що є критично важливим для стійкості транспортної системи в цілому.

Також, у даному розділі було продемонстровано процес створення моделі формування альтернативних маршрутів для пасажирського поїзда №715 сполученням Київ-Перемишль. Розроблена модель враховує такі фактори, як наявність електрифікації, пропускна спроможність ділянок, види транспорту, оперативна інформація щодо стану інфраструктури та багато інших параметрів. Також, було встановлено, що для пошуку оптимального рішення найбільш доцільне використання апарату генетичних алгоритмів. Важливою особливістю запропонованої моделі є можливість адаптації до різних умов і обмежень, що дозволяє швидко реагувати на непередбачені обставини та забезпечувати безперервність пасажирських перевезень.

Під час тестування моделі були розглянуті різні сценарії пошкодження інфраструктури, і було показано, як система пропонує альтернативні маршрути з використанням різних видів рухомого складу (тепловозів, «поїздів-шаттлів», автобусів). Застосування таких маршрутів забезпечує збереження високого рівня обслуговування пасажирів, знижуючи ризики виникнення затримок та можливих інших незручностей для пасажирів.

Впровадження розробленої технології було створено у вигляді програмного продукту для автоматизованих робочих місць оперативного персоналу у вигляді системи підтримки прийняття рішень (СППР), яка дозволить значно підвищити рівень надійності залізничних пасажирських перевезень та, в свою чергу, сприятиме підвищенню конкурентоспроможності залізничного транспорту в загальній транспортній системі України.

У *четвертому* розділі було розглянуто можливість інтеграції запропонованої технології до АРМів ДНЦ, що в подальшому дозволить поступово відмовитись від проведення оперативних нарад на рівні департаменту ЦУР та приймати рішення на рівні ДНЦ та начальника РЦУП, якому він підпорядковується. Такий підхід дасть змогу не лише пришвидшити прийняття оперативного рішення, стосовно подальшого руху заданого поїзду, а й зменшити рівень витрат та вірогідність людської помилки при формування нового альтернативного маршруту.

Також, було проведено оцінку економічного ефекту від впровадження запропонованої технології на наступні п'ять років, який виявився позитивним. Додаткові витрати на створення альтернативного маршруту було приведено до першого року життєвого циклу проекту, тобто було визначено суму витрат в теперішній вартості грошей (метод дисконтування) на 2024 рік.

У загальних висновках підсумовано виконання завдань досліджень і констатовано досягнення мети.

Ключові слова: пасажирські перевезення, альтернативний маршрут, залізнична інфраструктура, інтелектуальні технології, моделювання руху поїздів, прогнозування пасажиропотоків.

Tarasov K.O. Improving the organization of passenger transportation in conditions of damage to the railway infrastructure – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 275 – Transport technologies. – Ukrainian State University of Railway Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2025.

The dissertation is devoted to solving the scientific problem - improving the organization of passenger transportation in conditions of damage to the railway infrastructure with the possible use of additional “shuttle trains” and road transport. This approach will contribute to increasing the level of reliability and competitiveness of railway transport in passenger transportation, by minimizing additional operating costs compared to operating costs for regular scheduled transportation

The introduction proves the relevance of the chosen topic, provides a general description of the work, the applicant's personal contribution and testing of the research results, shows the connection of the work with scientific topics and programs, formulates the goal, objectives, object and subject of the research, outlines research methods and the position of scientific novelty, substantiates the practical significance of the results obtained.

The first section analyzes the state and development of railway passenger transportation, which showed that today, passenger transportation in Ukraine is provided only by road and rail transport. It is established that the Ukrainian railway network is a significant component of the country's transport infrastructure, playing an important role in ensuring passenger transportation at different levels: long-distance, regional and partly suburban connections. In particular, the railway transportation system has become critically important after the events of February 24, 2022, when changes in the transport system occurred as a result of the conflict. Passenger railway transport not only provides convenient access to different regions of the country, but also plays an important role in transporting the wounded, evacuating civilians and transporting high-ranking officials. In this difficult time, the railway has proven to be a reliable and important means of ensuring the mobility and security of citizens. Today, all railway transportation in Ukraine is carried out by a single operator, JSC UZ, in which the branches of the PC and UZSHK are directly responsible for organizing passenger transportation. An analysis of the main indicators of Intercity trains, as well as long-distance and regional connections, was conducted, which showed that the number of passengers transported during martial law decreased compared to previous years, but remained at a fairly high level, and also reached record figures towards EU countries. According to graphical analyses, changes in passenger traffic and passenger train occupancy levels were noted, but the railway managed to adapt and restore some stability by the end of the reporting period. This indicates a high level of organizational and technical preparedness of the railway transport of Ukraine even in emergency conditions.

The analysis of the causes of damage to the railway infrastructure showed that each of them has a specific nature of impact on the stability of the transportation process. It was found that the main factors of damage are natural disasters, transport incidents and military operations, each of which has its own characteristics of occurrence and scale of consequences. A particular threat to the railway network in modern conditions is military operations, which, according to the percentage analysis, are the cause of more than 53% of all cases of infrastructure damage. The results obtained showed that when planning and organizing passenger transportation, it is also necessary to take into account the risks of damage to the infrastructure.

In the second section, it was established that given the dynamics of political, social and economic changes, passenger traffic forecasting becomes critically important for rational planning and organization of passenger traffic. The current conditions of the market economy require passenger carriers to constantly adapt, introduce new technologies and methods of organizing transportation. Given the complexity and nonlinearity of passenger flows, especially taking into account their seasonal fluctuations, it is necessary to use methods that take into account the vagueness of the input information and ensure rapid adaptation to changes. Therefore, given the high accuracy, ability to automatically detect signs, effective work with large amounts of data, flexibility and the ability to test scenarios, a neural network apparatus was chosen to forecast passenger flows in a modern complex and dynamic environment.

Also, an analysis of passenger flows for 2022 by direction was conducted, which showed that the most popular direction was Lviv, which is associated with the evacuation of the population due to hostilities. It was established that high-speed trains of the Intercity+ category remain the most attractive for passengers due to shorter travel time, higher level of comfort and reliability of transportation, which is especially important for both business and tourist trips. Therefore, the passenger flow forecasting model for trains of this category was built on the example of train No. 715 on the Kyiv-Przemysl route, which turned out to be the most popular among passengers.

Also, the magnitude and influence of the hazard factor on the number of transported passengers was determined, depending on the daily number of shelling. The magnitude of the hazard factor is the percentage by which the number of transported passengers decreases due to the intensity of hostilities in a certain region. The formation of the hazard factor was carried out based on the defuzzification method.

As a result of the formation of a model based on neural networks for predicting passenger flow for train No. 715, the specified accuracy was achieved with an error of up to 5%. This indicates the effectiveness of using neural networks in predicting passenger flows. The resulting model allows you to predict with high reliability the number of passengers who will use the train on the specified route. The use of such a model will allow for more

accurate and efficient transportation planning, which will contribute to the optimization of the work of railway transport.

In the third section, within the framework of the conducted research, a comprehensive method for assessing the risk of passenger train delays has been developed, which takes into account the probabilistic characteristics of railway infrastructure damage under the influence of various risk factors. It has been established that the main causes of damage are natural disasters, transport events and hostilities. Individual probabilities of railway section damage have been calculated separately for each factor, and a mechanism for their dynamic combination into a general probability has been proposed, taking into account changes in the structure of damage over time.

The developed model of dynamic weight update allows for adaptive response to changes in external conditions, increasing the reliability of forecasting potential threats to the railway network. It has been determined that the risk of passenger train delays is calculated as the product of the total probability of damage and the mathematical expectation of the delay value, which is approximated by the normal distribution law according to statistical data.

The selected route Kyiv-Lviv was presented as a weighted graph, where the vertices represent the main railway stations, and the edges represent railway sections with weights in the form of time to overcome each section, the availability of electrification and capacity. Such a model allows for a more accurate assessment of train travel time and operating costs, which is important for the formation of alternative routes. It was established that the use of “shuttle trains” and road transport to transport passengers in the event of infrastructure damage or repair work ensures the flexibility and efficiency of the transport system. This makes it possible to quickly respond to unforeseen situations and maintain a high level of passenger service. An optimization mathematical model was proposed with the objective function of minimizing the increase in operating costs (compared to regular costs), which allows for an effective solution to this problem. The model takes into account the costs of traveling along an alternative route, the use of “shuttle trains” and bus transport, as well as additional train downtime. The introduction of Boolean variables and other parameters into the objective function allows for flexible modeling of various scenarios and transportation

conditions, ensuring accuracy and reliability of results. Thanks to the use of this mathematical model, it is possible to quickly determine optimal alternative routes in case of emergency situations, which allows minimizing downtime, reducing operating costs and ensuring timely arrival of passengers to their destination. This contributes to increasing the efficiency of railway network management, ensuring its reliability and adaptability to unpredictable conditions, which is critically important for the stability of the transport system as a whole.

Also, this section demonstrated the process of creating a model for forming alternative routes for passenger train No. 715 on the Kyiv-Przemysl route. The developed model takes into account such factors as the availability of electrification, the capacity of sections, types of transport, operational information on the state of the infrastructure and many other parameters. It was also found that the use of genetic algorithms is most appropriate to find the optimal solution. An important feature of the proposed model is the ability to adapt to various conditions and constraints, which allows for a quick response to unforeseen circumstances and ensure the continuity of passenger transportation.

During the testing of the model, various scenarios of infrastructure damage were considered, and it was shown how the system offers alternative routes using different types of rolling stock (diesel locomotives, "shuttle trains", buses). The use of such routes ensures the maintenance of a high level of passenger service, reducing the risks of delays and possible other inconveniences for passengers.

The implementation of the developed technology was created in the form of a software product for automated workplaces of operational personnel in the form of a decision support system (DSS), which will significantly increase the level of reliability of rail passenger transportation and, in turn, will contribute to increasing the competitiveness of rail transport in the general transport system of Ukraine. The fourth section considered the possibility of integrating the proposed technology into the SNC ARMs, which will subsequently allow for the gradual abandonment of operational meetings at the level of the SDG department and decision-making at the level of the SNC and the head of the RCPM to which it is subordinate. Such an approach will allow not only to speed up the adoption of an

operational decision regarding the further movement of a given train, but also to reduce the level of costs and the likelihood of human error when forming a new alternative route.

Also, an assessment of the economic effect of implementing the proposed technology for the next five years was carried out, which turned out to be positive. The additional costs for creating an alternative route were brought to the first year of the project life cycle, that is, the amount of costs in the present value of money (discount method) for 2024 was determined.

The general conclusions summarize the implementation of the research tasks and state the achievement of the goal.

Keywords: passenger transportation, alternative route, railway infrastructure, intelligent technologies, train traffic modeling, passenger flow forecasting.

Список публікацій здобувача

Наукові праці в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Публікації у фахових виданнях України:

1. Бутко Т. В., Примаченко Г. О., Тарасов К. О. Удосконалення існуючих методів організації пасажирських залізничних перевезень з урахуванням можливих ризиків руйнування залізничної інфраструктури. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2022. Т. 27, № 3. С. 3–9.

URL: <https://doi.org/10.18664/iksz.v27i3.265527>

2. Примаченко Г.О., Шкурченко О.В., Будник В.А., Корнійко Я.Р., Тарасов К.О. Удосконалення технології мультимодальних пасажирських перевезень в умовах воєнного стану в Україні. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*, 2023. № 100. С. 120.

URL: <https://doi.org/10.30977/bul.2219-5548.2023.100.0.120>

3. Бутко Т.В., Пархоменко Л. О., Тарасов К.О., Гайдук Д.А. Формалізація процедури надання альтернативного маршруту швидкісним пасажирським поїздам на основі ризик-менеджменту. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному*

транспорті. 2023. Т. 28, № 1. С. 31–37.

URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i1.276341>

4. Тарасов К.О. Удосконалення чинної системи оперативного управління швидкісними залізничними пасажирськими перевезеннями *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. Т. 29, № 3. С. 33–40.

URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i3.313607>

Публікації, що включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та WoS:

5. Butko T., Prymachenko H., Kovalov A., Tarasov K., Kolisnyk A. Research on the Issue of Prognosticationing the Volume of Passenger Traffic on Railway Transport in Meanrn Conditions. *Review of Economics and Finance*. 2023. Vol. 21. P. 236–245.

URL: <https://doi.org/10.55365/1923.x2023.21.22> (Scopus)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Butko T., Primachenko H., Tarasov K. Formation of alternative routes for passenger trains in the event of non-standard situations. *MATEC Web of Conferences*. 2024. Vol. 390. P. 03003. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/202439003003> (Web of Science)

7. Примаченко Г.О., Тарасов К.О., Григорова Є.І. Удосконалення логістичного управління при перевезенні пасажирів. *Інформаційно - керуючі системи на залізничному транспорті: тези стендових доповідей та виступів учасників 34-ї міжнародної науково-практичної конференції*. Харків: УкрДУЗТ, 2021. - №3 (Додаток). – С. 15. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2021/10/34-mnpk_2021.pdf

8. Примаченко Г.О., Тарасов К.О. Дослідження технології визначення прогносної оцінки пасажирообігу на залізничному транспорті. *Нові інформаційні технології управління бізнесом: тези V Всеукраїнської науково-практичної конференції*. (Київ, 16 лютого 2022 р.). – Київ: Спілка автоматизаторів бізнесу, 2022. С. 238-241. URL: [http://www.unionba.com.ua/seminars/v-vseukrayinska-naukovo-practicna-konferenciya](http://www.unionba.com.ua/seminars/v-vseukrayinska-naukovo-prakticna-konferenciya)

9. Примаченко Г.О., Тарасов К.О., Григорова Є.І. Підвищення надійності транспортних систем на основі удосконалення організаційно-технологічної структури проектів мультимодальних перевезень. *Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем*: матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції (Кропивницький, 13-15 квітня 2022 р). Кропивницький : ЦНТУ, 2022. С. 108-110. URL: <http://erm.kntu.kr.ua/KONFERENSIIA.html>

10. Prymachenko H.O., Tarasov K.O. Organization of rail transportation in martial law conditions. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика*: матеріали вісімнадцятої науково - практичної міжнародної конференції (Харків, 2 – 3 червня 2022 р.) Харків: УкрДУЗТ, 2022. С 178-180.

11. Примаченко Г.О., Тарасов К.О., Григорова Є.І., Карпенко Н.А. Сучасний стан логістики вантажних перевезень в Україні. *Інтелектуальні транспортні технології*: тези 3-ї міжнародної науково-технічної конференції (Харків, 22 – 23 листопада 2022 р.) Харків: УкрДУЗТ, 2022. С 145-147. (заочна участь)

12. Примаченко Г.О., Тарасов К.О., Григорова Є.І. Удосконалення процесу міжнародних залізничних перевезень в Україні. *Інформаційно- керуючі системи на залізничному транспорті*: тези стендових доповідей та виступів учасників 35-ї міжнародної науково-практичної конференції. (Харків, 11 листопада 2022 р.) Харків: УкрДУЗТ, 2022. №3 (Додаток). С. 19-20. URL: <https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2022/11/tezi-3dodatok-2022.pdf>

13. Примаченко Г.О., Тарасов К.О. Удосконалення процесу організації пасажирських залізничних перевезень при виникненні нестандартних ситуацій. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика*: тези дев'ятнадцятої науково - практичної міжнародної конференції (Харків, 1-2 червня 2023 р.) Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 168-170.

14. Butko T., Primachenko H., Tarasov K. Formation of alternative routes for passenger trains in the event of non-standard situations. *Energy-optimal technologies, logistics and safety on transport*: materials of the 3-nd International Scientific and Practical Conference (Lviv, 9–10 November 2023) Lviv Polytechnic Publishing House. 2023 P. 58-59

15. Примаченко Г.О., Тарасов К.О., Родін Р.Д. Удосконалення організації руху регіональних поїздів за допомогою адаптивного метаевристичного підходу *Інтелектуальні транспортні технології: тези 4-ї міжнародної науково-технічної конференції* (Харків, 27 – 28 листопада 2023 р.) Харків: УкрДУЗТ, 2023. С 204-205. URL: <https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2023/11/zbirnik-tez-dopovidej-itt2023-1.pdf>

16. Примаченко Г.О., Тарасов К.О. Організація пасажиропотоків за умови еластичного попиту. *Прикладні науково-технічні дослідження: матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції*. (Івано-Франківськ, 14-16 травня 2024 р.) Академія технічних наук України. – Івано-Франківськ : Видавець Кушнір Г. М. – 2024. – С. 211-212. URL: <https://ukrtsa.org.ua/wp-content/uploads/2024/05/conf2024.pdf>

17. Примаченко Г.О., Тарасов К.О. Формування альтернативних маршрутів для пасажирських поїздів на основі генетичних алгоритмів. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика: тези двадцятої науково - практичної міжнародної конференції*. (Харків, 6-7 червня 2023 р.) Харків: УкрДУЗТ, 2024. С. 164-165.

Додаткові праці, які відображають результати дисертації:

18. Тарасов К. О. Формування альтернативних маршрутів пасажирських поїздів за допомогою апарату генетичних алгоритмів. *Транспортні технології в сучасних умовах* : колективна монографія / за заг. ред. Г. О. Примаченко. – Академія технічних наук України. – Івано-Франківськ: Видавець Кушнір Г. М. – 2024. - 212 с. – С. 111–143.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	19
ВСТУП	20
РОЗДІЛ I АНАЛІЗ СТАНУ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УКРАЇНІ	27
1.1 Дослідження стану та розвитку пасажирських перевезень в Україні	27
1.2 Аналіз основних поїздів далекого сполучення	33
1.3 Аналіз основних показник регіональних поїздів та поїздів філії УЗШК	36
1.4 Аналіз досвіду удосконалення організації пасажирських перевезень	41
1.5 Аналіз причин пошкодження залізничної інфраструктури	48
1.6 Висновки до першого розділу	53
РОЗДІЛ II ФОРМУВАННЯ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ПАСАЖИРОПОТОКІВ НА ГРАФІКОВИХ ЗУПИНКАХ	56
2.1 Прогнозування пасажиропотоків на графікових зупинках	56
2.2 Визначення найбільш оптимального методу прогнозування пасажиропотоків	57
2.3 Визначення найбільш перспективного напрямку пасажирських перевезень в Україні	62
2.4 Побудова моделі прогнозування пасажиропотоку на графікових зупинках із застосуванням апарату штучних нейронних мереж	67
2.5 Висновки до другого розділу	79
РОЗДІЛ III ФОРМУВАННЯ МОДЕЛІ ОРГАНІЗАЦІЇ АЛЬТЕРНАТИВНИХ МАРШРУТІВ ПАСАЖИРСЬКИХ ПОЇЗДІВ	82
3.1 Визначення ризику затримки пасажирських поїздів внаслідок пошкодження залізничної інфраструктури.	82
3.2 Формування графу для обраного напрямку	90
3.3 Формування цільової функції та системи обмежень	95
3.4 Визначення найбільш оптимального методу моделювання для знаходження альтернативних маршрутів	103

3.5 Вирішення задачі мінімізації додаткових витрат за допомогою апарату генетичних алгоритмів	107
3.6 Апробація отриманих результатів	117
3.7 Висновки до третього розділу	120
РОЗДІЛ IV ФОРМУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ НАДАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО МАРШРУТУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІД ЇЇ ВПРОВАДЖЕННЯ	124
4.1 Організація оперативного управління на мережі українських залізниць	124
4.2 Формування системи оперативного управління пасажирськими перевезеннями після впровадження технології	131
4.3 Оцінка економічного ефекту від впровадження запропонованої технології	136
4.4 Висновки до четвертого розділу	146
ВИСНОВКИ	149
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	155
Додаток А Аналіз пасажирського вагонного парку АТ «Укрзалізниця»	173
Додаток Б Загальна кількість перевезених пасажирів залізничним транспортом за 2018-2023 роки	174
Додаток В Частки перевезених пасажирів в залежності від категорій поїздів за 2018 – 2023 роки	175
Додаток Г Загальна кількість рейсів пасажирських поїздів за 2018 – 2023 роки	176
Додаток Д Кількість пар пасажирських поїздів за 2018 – 2023 роки	177
Додаток Е Аналіз кількості перевезених пасажирів поїздами дальнього сполучення за напрямками за 2021-2023 роки	178
Додаток Ж Кількість перевезених пасажирів поїздами філії УЗШК за 2021-2023 роки	179
Додаток И Населеність поїздів філії УЗШК за 2021-2023 роки	182
Додаток К Фрагмент вхідних даних для прогнозування посадки та висадки пасажирів по ст. Вінниця на поїзд 715	185

Додаток Л Координати для побудови графа G	186
Додаток М Матриці суміжності для графа G	187
Додаток Н Фрагмент коду програмного продукту для вирішення задачі маршрутизації на основі ГА	191
Додаток П Порівняння часу на пошук та вибір оптимального альтернативного маршруту для пасажирського поїзда в разі пошкодження залізничної інфраструктури	194
Додаток Р Оцінка величини додаткових витрат на п'ять років до та після застосування запропонованої технології	200
Додаток С Список публікацій здобувача за темою дисертаційної роботи та відомості про апробацію результатів	202
Додаток Т Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	207

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПК- Пасажирська компанія;
УЗШК - Українська залізнична швидкісна компанія;
ПКВЧ - Пасажирська вагонна дільниця;
ПКВЧД - Пасажирське вагонне депо;
КВБЗ - Крюківський вагонобудівний завод ;
АТ УЗ – Акціонерне товариство «Укрзалізниця»;
ЄС – Європейський союз;
МАУ – Міжнародні авіалінії України;
ГА – генетичний алгоритм;
DEAP - Distributed Evolutionary Algorithms in Python;
ДТП – Дорожньо-транспортна пригода;
ДСП – Черговий по станції;
ДНЦ – Поїзний диспетчер;
ДГП – Черговий по відділенню;
ЧПР – Черговий по району
ЦРБ – Головний ревізор з безпеки руху
FFNN - Feedforward Neural Network

ВСТУП

Актуальність теми. Надійне перевезення пасажирів є одним із найважливіших завдань будь-якого виду транспорту, серед яких не є виключенням і залізничний. Не зменшилась його актуальність і після введення військового стану на території України 24 лютого 2022 року. Так, саме пасажирський залізничний транспорт взяв на себе величезну відповідальність за транспортування поранених військових та цивільних громадян, евакуацію мирного населення з тих районів де бойові дії несуть найбільш активний характер, перевезення високопоставлених українських та закордонних представників тощо. Тому, при організації будь-якого з видів пасажирських залізничних перевезень (швидкісного, дальнього сполучення, регіонального, тощо), має бути оцінений можливий вплив зовнішніх та внутрішніх факторів, які можуть безпосередньо вплинути на надійність, перевезень, кінцеву собівартість та загальний час прямування.

Нажаль, в сьогоденних військових реаліях руйнування залізничної інфраструктури не є рідкістю. Кожне пошкодження залізничної інфраструктури, наслідком якого є повне закриття ділянки на певний термін, вимагає створення альтернативного маршруту для пасажирських поїздів, маршрут прямування яких мав проходити через цю ділянку. Оскільки кожному пасажирові, після посадки, важливо дістатися до кінцевої станції призначення в повній безпеці та з мінімальним відхиленням від запланованого часу, а для перевізника, ще й до цього, важливо організувати цю поїздку з мінімальною собівартістю, то існує необхідність у створенні системи підтримки прийняття рішень, основою якої є оптимізаційна математичної модель, яка б змогла в оперативному режимі сформувати альтернативний маршрут з максимальним задоволенням потреб згаданих вище сторін.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 27.12.2024 р. № 1550 «Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках», «Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони,

та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони», ратифікованої Законом України №–VII від 16.09.2014 р.

Автор брав участь у якості виконавця у науково-дослідних роботах на тему «Удосконалення вантажних перевезень за участю залізничного транспорту на базі логістичних принципів» ДР № 0123U101818, а також «Логістичний потенціал мультимодальних перевезень за участю водного транспорту» ДР № 0121U109444

Мета дослідження. Метою дисертаційної роботи організація пасажирських перевезень в умовах пошкодження залізничної інфраструктури шляхом надання альтернативних маршрутів пасажирським поїздам

Реалізація цієї мети потребує постановки та вирішення таких задач дослідження:

- провести аналіз стану та розвитку пасажирських залізничних перевезень в Україні в сучасних умовах та визначити найбільш пріоритетний напрямок та категорію для пасажирських поїздів в Україні;

- сформулювати модель прогнозування кількості пасажирів, що здійснюють посадку та висадку на кожній графіковій зупинці на основі найбільш впливових факторів таких як сезонність перевезень та ефект вихідного дня

- визначити основні причини руйнування залізничної інфраструктури та розробити методику оцінки ризику затримки пасажирських поїздів у наслідок пошкодження залізничної інфраструктури

- створити оптимізаційну математичну модель за критерієм зменшення додаткових витрат для обраної категорії пасажирських поїздів при виникненні пошкодження інфраструктури із можливим залученням додаткових «поїздів-шаттлів» або автомобільного транспорту;

- сформулювати автоматизовану технологію надання альтернативного маршруту пасажирському поїзду в разі пошкодження залізничної інфраструктури;

- адаптувати отриману автоматизовану технологію надання альтернативних маршрутів пасажирських поїздів з існуючою системою оперативного управління при пошкодженні залізничної інфраструктури

- обґрунтувати економічну доцільність удосконалення організації пасажирських перевезень в умовах пошкодження залізничної інфраструктури

Об'єкт дослідження – процес організації пасажирських перевезень залізничним транспортом в Україні.

Предмет дослідження – технологія залізничних пасажирських перевезень за альтернативними маршрутами в умовах пошкодження залізничної інфраструктури.

Методи дослідження. Для дослідження розподілу пасажиропотоків за основними маршрутами руху поїздів дальнього та швидкісного сполучення застосовано методи математичної статистики. Для визначення ймовірності пошкодження залізничної дільниці, було використано метод нормування кожного з факторів, який може стати причиною пошкодження інфраструктури. Для визначення ризику затримки пасажирських поїздів в наслідок пошкодження залізничної інфраструктури було використано метод зважених коефіцієнтів. Для формування моделі прогнозування величини посадки та висадки пасажирів на графікових зупинках було застосовано метод штучних нейронних мереж. При формуванні моделі організації альтернативних маршрутів було використано елементи теорії графів та моделювання на основі генетичних алгоритмів (ГА).

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі вирішено наукове завдання щодо удосконалення організації пасажирських перевезень в умовах пошкодження залізничної інфраструктури.

Вперше:

– Розроблено метод оцінки ризику затримки пасажирських поїздів, який на відмінність від існуючих, базується на динамічному наданні ваг ймовірностям пошкодження залізничної інфраструктури для кожної дільниці залізничної мережі, в залежності від наближення до зони бойових дій, впливів факторів природного характеру, інтенсивності руху поїздів та питомої кількості об'єктів критичної інфраструктури. Це дозволило підвищити точність розрахунку потенційних затримок та знаходити оперативні управлінські рішення щодо руху пасажирських поїздів у наслідок пошкодження залізничної інфраструктури.

– Для формалізації процесу організації пасажирських перевезень при пошкодженні залізничної інфраструктури розроблено процедуру пошуку альтернативного маршруту на основі оптимізаційної математичної моделі з цільовою функцією мінімізації додаткових витрат, яка на відмінність від існуючих, передбачає можливі альтернативні варіанти прямування пасажирів поїзда власною тягою або із залученням допоміжного локомотиву, використання «поїзда-шаттлу» або автомобільного транспорту. Поставлену оптимізаційну задачу розв’язано за допомогою апарату генетичних алгоритмів з урахуванням моделі прогнозування кількості пасажирів, що здійснюють посадку та висадку на кожній графіковій зупинці на основі штучних нейронних мереж. Це дозволило вперше автоматизувати процес прийняття оперативних управлінських рішень для організації оптимального альтернативного маршруту для пасажирських поїздів на основі системи підтримки прийняття рішень для автоматизованих робочих місць оперативного персоналу.

Удосконалено:

– комплекс функціональних задач автоматизованих робочих місць поїзного диспетчера (АРМ ДНЦ), а також диспетчерів філії «Пасажирська компанія», на основі сформованої системи підтримки прийняття рішень, який забезпечує надання оптимального альтернативного маршруту у випадках пошкодження залізничної інфраструктури. Такий підхід надає властивість гнучкості системі організації пасажирських залізничних перевезень.

Практичне значення одержаних результатів. Сформовано автоматизовану технологію надання альтернативних маршрутів для пасажирських поїздів в умовах пошкодження залізничної інфраструктури. Зазначена технологія дає змогу прискорити та здешевити процес знаходження та надання альтернативного маршруту для пасажирського поїзда у випадках коли необхідне повне закриття певної ділянки через пошкодження залізничної інфраструктури або плановий ремонт.

Основні результати і розроблені наукові підходи до удосконалення організації пасажирських перевезень в умовах пошкодження залізничної інфраструктури застосовано та впроваджено на регіональній філії «Південна залізниця», а також у навчальний процес факультету «Управління процесами перевезень» Українського

державного університет залізничного транспорту (УкрДУЗТ). Практичне впровадження результатів роботи підтверджується відповідними актами, які наведені в Додатку Т.

Особистий внесок здобувача. Результати, що становлять основний зміст дисертаційного дослідження, отримані автором самостійно в Українському державному університеті залізничного транспорту. У наукових працях, опублікованих зі співавторами, особистий внесок полягає у такому: у статті [19] сформовано оптимізаційну математичну модель з використанням теорії ризиків (а саме можливих руйнувань інфраструктури), яка дозволяє визначити оптимальну кількість пасажирських поїздів і їхній склад: у статті [20] виявлено залежність часу затримки поїзда на прикордонній станції від кількості пасажирів у ньому, та з метою зменшення тривалості таких затримок запропоновано вдосконалення наявної технології розрахунку часу слідування пасажирського поїзда шляхом упровадження й використання величини F , що відповідає часу затримки поїзда на прикордонній станції на одного пасажирів; у статті [21] проведено аналіз статистичних даних, щодо кількості перевезених пасажирів залізничним транспортом; у науковій праці [22] було проаналізовано можливість інтеграції цієї системи з існуючими структурами управління та автоматизованими робочими місцями поїзних диспетчерів (АРМ ДНЦ) та її вплив на підвищення загальної ефективності роботи залізничного транспорту в надзвичайних ситуаціях; у статті [23] проведено аналіз факторів впливу на величину пасажиропотоку та сформовано модель прогнозування пасажиропотоків на основі апарату нейронних мереж;

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації були викладені у розділі колективної монографії «Транспортні технології в сучасних умовах», а також доповідалися, обговорювалися та ухвалені на таких конференціях:

- тридцять четвертій міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційно - керуючі системи на залізничному транспорті» (Харків, УкрДУЗТ, 2021 р.);
- п'ятій всеукраїнській науково-практичній конференції «Нові інформаційні технології управління бізнесом» (Київ, 16 лютого 2022 р.);

- четвертій міжнародній науково-практичній конференції «Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем: матеріали» (Кропивницький, 13-15 квітня 2022 р.);
- вісімнадцятій науково - практичній міжнародній конференції «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика» (Харків, 2 – 3 червня 2022 р.)
- третій міжнародній науково-технічній конференції «Інтелектуальні транспортні технології» (Харків, 22 – 23 листопада 2022 р.);
- тридцять п'ятій міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційно- керуючі системи на залізничному транспорті» (Харків, 11 листопада 2022 р.);
- дев'ятнадцятій науково - практичній міжнародній конференції «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика» (Харків, 1-2 червня 2023 р.);
- 3-d International Scientific and Practical Conference «Energy-optimal technologies, logistics and safety on transport» (Lviv 9–10 November 2023);
- четвертій міжнародній науково-технічній конференції «Інтелектуальні транспортні технології» (Харків, 27 – 28 листопада 2023 р.);
- шостій міжнародній науково-практичній. конференції «Прикладні науково-технічні дослідження» (Івано-Франківськ, 14-16 травня 2024 р.);
- двадцятій міжнародній науково - практичній конференції «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика» (Харків, 6-7 червня 2023 р.)

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 4 наукові статті у фахових виданнях затверджених МОН України (1 із них є одноосібною), 1 стаття у базі даних Scopus, 1 стаття у матеріалах конференції (WoS), 11 тез доповідей на науково-практичних конференціях та підготовлено 1 розділ колективної монографії.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг

дисертаційної роботи складає 209 сторінок, з яких обсяг основного тексту 133 сторінок. Робота ілюстрована 49 рисунками (з них 1 рисунок на 1 окремій сторінці) , наведено 3 таблиці, список використаних джерел із 140 найменувань на 18 сторінках і 15 додатків на 37 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УКРАЇНІ

1.1 Дослідження стану та розвитку пасажирських перевезень в Україні

Пасажирські перевезення в Україні є важливою складовою транспортної системи, що забезпечує зручні та доступні способи пересування для населення. Дослідження їх стану та розвитку є ключовим аспектом для визначення ефективності транспортних послуг, виявлення тенденцій у сфері транспортних потреб населення та формування стратегій подальшого розвитку транспортної інфраструктури країни. Усі пасажирські перевезення в Україні можуть виконуватися за допомогою автомобільного, залізничного, авіаційного або морського транспорту, кожен з яких має свої сильні та слабкі сторони.

Одним з основних показників для оцінки ефективності різних видів транспорту – є кількість перевезених пасажирів. Якщо подивитися на статистичні дані в таблиці 1.1, то можна побачити, що лідером по кількості перевезених пасажирів є автомобільний транспорт.

Таблиця 1.1 Кількість перевезених пасажирів за видами транспорту, млн. пас.

	2018р.	2019р.	2020р.	2021р.	2022р.	2023р.
Автомобільний	1906.8	1804.9	1083.9	1089.3	1869.3	1913.4
Залізничний	198.0	154.8	68.3	81.3	170,1	181,4
Авіаційний	12.5	13.7	4.8	9.3	0.5	0
Водний	0.7	0.7	0.3	0.5	0	0

Автомобільний транспорт є найпопулярнішим видом транспорту в Україні завдяки своїй гнучкості, доступності та зручності для пасажирів. Україна має розгалужену дорожню мережу, яка включає як державні автомагістралі, так і місцеві дороги. Загальна протяжність доріг становить понад 169 тисяч км, з яких понад 20

тисяч км складають дороги державного значення. Основні магістралі з'єднують великі міста, забезпечуючи ефективний транспортний зв'язок між ними. В містах та селищах діє розгалужена мережа автобусних станцій та зупинок, що забезпечує зручність пересування для пасажирів. Автомобільний транспорт може рухатися по будь-яких дорогах, забезпечуючи перевезення "від дверей до дверей". Це особливо важливо в регіонах з погано розвинутою інфраструктурою. Для коротких поїздок автомобільний транспорт зазвичай швидший за залізничний чи повітряний транспорт через відсутність необхідності пересадок та очікування, а завдяки розвиненій дорожній мережі та наявності різних типів транспортних засобів (автобуси, маршрутки, таксі), автомобільний транспорт доступний у всіх регіонах країни. Також, у разі пошкодження інфраструктури іншого виду транспорту, саме автомобільний транспорт може бути залученим задля доставки пасажирів до кінцевого пункту або пункту пересадки.

До недоліків автомобільного транспорту можна віднести те, що він має достатньо високі витрати на паливо, технічне обслуговування та ремонт автомобілів. Окрім цього, не дивлячись на те, що в останні роки в Україні реалізується ряд проектів з будівництва та реконструкції доріг, включаючи міжнародні магістралі та об'їзні дороги навколо великих міст, багато доріг знаходяться в незадовільному стані, що негативно впливає на час проведень в дорозі та рівень аварійності. Щодо екологічного впливу, то автомобільний транспорт є основним джерелом викидів забруднюючих речовин у повітря, що сприяє погіршенню екологічної ситуації. Загалом, автомобільний транспорт в Україні є невід'ємною частиною повсякденного життя громадян, забезпечуючи високу мобільність та доступність. Незважаючи на виклики, пов'язані з інфраструктурою та екологією, розвиток сучасних технологій та інвестиції в інфраструктурні проекти сприяють покращенню якості та ефективності цього виду транспорту.

Наступним транспортом за кількістю перевезених пасажирів - є залізничний транспорт. Мережа Українських залізниць, за своєю топологією, має досить розгалужений характер. Їх експлуатаційна довжина, за винятком непідконтрольних українській владі територій (станом до 24.02.2022) становить 19,8 тис. км., з яких 47,2

% є електрифікованими [19]. В дорожньо-транспортному комплексі нашої країни залізничний транспорт є одним із основних та залишається одним із каталізаторів розвитку економіки. Залізниця залишається одним із найдоступніших видів транспорту, при чому як за ціновими характеристиками, так і за географічним охопленням. Українські залізниці займають шосте місце у світі за пасажирообігом [20]. Крім цього, залізниця є ключовим активом для забезпечення мобільності населення і єдності держави.

Події після 24 лютого 2022 року внесли свої суттєві корективи в загальну транспортну систему України, в тому числі і на систему організації залізничних пасажирських перевезень. Не дивлячись на те, що види сполучень, залишилися такими ж самими, як і в довоєнний період (міжнародне, дальнє, регіональне, приміське, Intercity), суттєво змінилася логістика, величини пасажиропотоків та специфіка їх пропуску. Саме пасажирський залізничний транспорт взяв на себе величезну відповідальність за транспортування поранених військових та цивільних громадян, евакуацію мирного населення з тих районів де бойові дії несуть найбільш активний характер, перевезення високопоставлених українських та закордонних представників тощо.

Пасажирський залізничний транспорт має достатньо велику пасажиромісткість по відношенню до інших видів транспорту. Кожен поїзд здатен перевозити значну кількість пасажирів за один рейс, що робить цей вид транспорту ефективним для масових перевезень. Також, витрати на перевезення пасажирів поїздами на великі відстані є нижчими порівняно з автомобільним транспортом, особливо враховуючи ціну на паливо та технічне обслуговування. Окрім цього, залізничний транспорт вважається одним із найекологічніших видів транспорту завдяки меншому викиду парникових газів.

Недоліками залізничного транспорту є те, що багато ділянок залізничної мережі потребують модернізації та ремонту, проте, сучасні технології та інвестиції можуть значно підвищити ефективність та надійність залізничного транспорту. Також залізничний транспорт часто поступається автомобільному транспорту через більшу гнучкість та швидкість останнього. Окрім цього, залізничний транспорт має велику

частку застарілого рухомого складу, який потребує оновлення для забезпечення більшого комфорту та безпеки пасажирів.

На сьогоднішній день, забезпечення пасажирських залізничних перевезень дальнього, регіонального та частково приміського сполучення виконується філією «Пасажирська компанія» (ПК), а швидкісні залізничні перевезення категорії Intercity та Intercity+ виконуються філією «Українська залізнична швидкісна компанія» (УЗШК). Міжнародні залізничні перевезення можуть виконуватись як ПК (наприклад поїзди №73/74 сполученням Харків-Перемишль, №93/94 сполученням Харків-Хелм, №351/352 сполученням Київ-Кишинів тощо.), так і УЗШК (поїзди №705/706, 715/716 сполученням Київ-Перемишль).

До філії ПК належить 9 вагонних дільниць (ПКВЧ) та 8 вагонних депо (ПКВЧД) розташованих по всій території України. Приписний парк пасажирських вагонів філії ПК, на підконтрольних українській владі територіях, становить 3282 вагонів, загальний – 3304 вагонів, детальний аналіз вагонного парку філії ПК наведено в додатку А.

Філія УЗШК має на своєму балансі десять 9-вагонних поїздів виробництва Hyundai Rotem місткістю на 579 посадочних місць кожен, два 6-вагонних, двоповерхових поїзда виробництва Skoda (623 посадочних місць), два 9-вагонних поїзда «Тарпан» (612 посадочних місць) виробництва Крюківського вагонобудівного заводу (КВБЗ) та 10 вагонів під локомотивну тягу «Україна-2» також виробництва КВБЗ.

Загалом, залізничний транспорт в Україні відіграє критичну роль у забезпеченні пасажирських перевезень, особливо на середні та довгі відстані. Він пропонує високу пасажиромісткість, економічність та екологічність. Проте, для підвищення конкурентоспроможності необхідно вкладати в модернізацію інфраструктури, оновлення рухомого складу та впровадження сучасних технологій.

Третім за кількістю перевезених пасажирів є – авіаційний транспорт, який є важливим засобом пересування, забезпечуючи швидкі та зручні перевезення як усередині країни, так і за її межами.

Україна має ряд міжнародних аеропортів, що обслуговують пасажирські та вантажні перевезення. Найбільші з них розташовані у Києві (Бориспіль та Жуляни), Харкові, Львові, Одесі та Дніпрі. Крім того, існують регіональні аеропорти, які обслуговують внутрішні та міжнародні польоти на рівні місцевих областей. В Україні працюють різні авіакомпанії, які забезпечують пасажирські та вантажні перевезення як внутрішньо, так і міжнародно. До найбільших авіакомпаній належать МАУ (Міжнародні Авіалінії України), SkyUp Airlines, Windrose Aviation та інші. Українські авіакомпанії пропонують пасажирам широкий вибір польотів як усередині країни, так і до різних країн світу. Пасажирам надаються різні класи обслуговування, включаючи економ, бізнес та перший клас, залежно від авіакомпанії та типу літака. Також, авіаційним транспортом виконуються чартерні польоти, організовані для конкретних груп пасажирів або туристичних подорожей. Вони можуть бути використані для відпочинку, бізнес-подорожей або спеціальних заходів.

Авіаційний транспорт має такі переваги як можливість пасажирам швидко подолати великі відстані, що робить їх ідеальним вибором для міжнародних подорожей або подорожей на великі відстані в межах країни, а також переважність у власному парку сучасних літаків оснащених різними зручностями для пасажирів, включаючи комфортні сидіння, розваги на борту, харчування та інші сервіси. Також авіаперевезення, за кількістю транспортних випадків, є одними з найбільш безпечними, а наявні авіаційні мережі з'єднують Україну зі всім світом, забезпечуючи можливість подорожувати в будь-яку точку планети з відносною легкістю.

До недоліків авіаційного транспорту можна віднести те, що перельоти літаком можуть бути дорожчими порівняно з іншими видами транспорту, особливо на короткі відстані. Окрім цього Авіаційний транспорт вважається одним із найбільш забруднюючих для навколишнього середовища через великі викиди CO₂ та інших забруднюючих речовин, а наявність поганих погодних умов може впливати на регулярність та безпеку авіаперельотів. Також, варто зазначити, що через початок бойових дій та введення воєнного стану в Україні, усі авіаперевезення на території нашої держави тимчасово призупинені.

Останнім видом транспорту, який задіяний для перевезення пасажирів - є водний транспорт. Водний транспорт в Україні є важливою складовою транспортної системи, особливо з урахуванням географічного розташування країни та наявності великих водних шляхів, таких як річки та морські порти. Відповідно до цього водний транспорт в Україні поділяється на річний та морський.

Річковий пасажирський транспорт складається з паромних та туристичних (круїзних перевезень). Паромні перевезення діють на річках Дніпро, Дунай та їхніх притоках, які забезпечують транспортний зв'язок між областями та регіонами, що розташовані вздовж водних шляхів. Це дозволяє мешканцям віддалених населених пунктів зручно та швидко дістатися до більших міст. Річкові круїзи набирають популярності серед туристів, які бажають побачити красу українських річок та природних пам'яток. Такі круїзи часто включають екскурсії до історичних міст та пам'яток, що розташовані вздовж берегів рік.

Щодо морських пасажирських перевезень, то морські порти України обслуговують пасажирські судна, які здійснюють регулярні маршрути до різних країн світу, а також пасажирські лінії вздовж українського узбережжя Чорного та Азовського морів. Такі перевезення можуть бути використані для подорожей в межах країни або для виїзду за кордон. Крім того, морські порти України також виходять на популярні туристичні маршрути для круїзних лайнерів. Туристи можуть відправитися в захоплюючі подорожі, відвідуючи різноманітні порти та екскурсійні місця вздовж українського узбережжя.

Перевагами водного транспорту є те, що він має найменші витрати на перевезення порівняно з іншими видами транспорту, та один з найменших рівень викиду шкідливих газів, що робить його більш екологічною альтернативою.

Недоліками водного транспорту є те, що він може бути обмеженим у використанні у внутрішніх регіонах країни, де відсутні великі водні шляхи, а також наявність залежності від поганих погодних умов, таких як шторми чи льодові перешкоди. Окрім цього, задля підвищення ефективності та безпеки перевезень, деякі водні шляхи та порти потребують чималої модернізації та ремонту. Після початку

повномасштабного вторгнення Росії в Україну водний пасажирський транспорт також тимчасово припинив свою роботу на території нашої держави.

Отже, на сьогоднішній день, пасажирські перевезення в Україні забезпечуються лише автомобільним та залізничним транспортом. Автомобільний транспорт має ряд переваг над залізничним завдяки своїй гнучкості, доступності та частоті рейсів. Проте, варто відзначити, що залізничний транспорт також є достойним конкурентом, забезпечуючи комфорт, безпеку та можливість подорожі на великі відстані з високою швидкістю. Його мережа охоплює значну частину країни, забезпечуючи зручний доступ до багатьох населених пунктів. Таким чином, залізничний транспорт інколи може бути перевагою для пасажирів, які шукають комфортну і ефективну подорож на великі відстані.

1.2 Аналіз основних показників поїздів далекого сполучення

Як відомо, 2022 рік став одним з найскладніших для нашої країни, проте залізничний транспорт впевнено зміг здолати всі перешкоди та зайняв лідируючі позиції по кількості перевезених пасажирів.

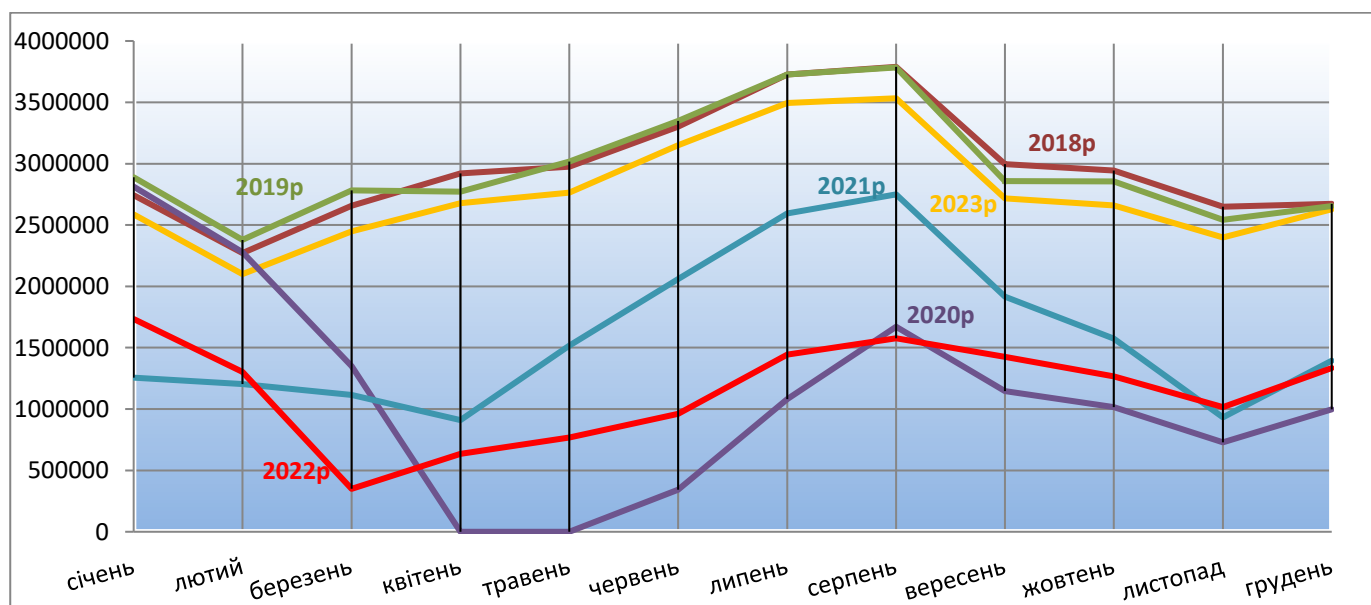


Рисунок 1.1 Динаміка кількості перевезених пасажирів поїздами дальнього сполучення у 2018-2023р.

Так, за 2022 рік, усіма видами пасажирських поїздів, окрім приміських було перевезено більше 16,9 млн пасажирів, що в свою чергу становить 70% від цього ж показника за 2021 (24,3 млн. пас) рік та 98% за карантинний 2020 рік. (17 млн. пас). Графічний аналіз загальної кількості перевезених пасажирів поїздами дальнього сполучення за 2018-2023 роки наведено на рисунку 1.1.

Як бачимо з наведеного графіку, початок повномасштабної війни Росії проти України викликав стрімке падіння рівня пасажиропотоку, проте до кінця 2022 року, ситуація стабілізувалася, а у 2023 році, кількість перевезених пасажирів вийшла на довоєнний рівень. Частки від загальної кількості перевезених пасажирів різними видами пасажирських поїздів у 2022-2023 роках, майже не змінилися по відношенню до 2021 року: поїзда дальнього сполучення у 2022-2023 роках перевезли 82% та 81% відповідно від загальної кількості пасажирів, проти 79% у 2021 році.

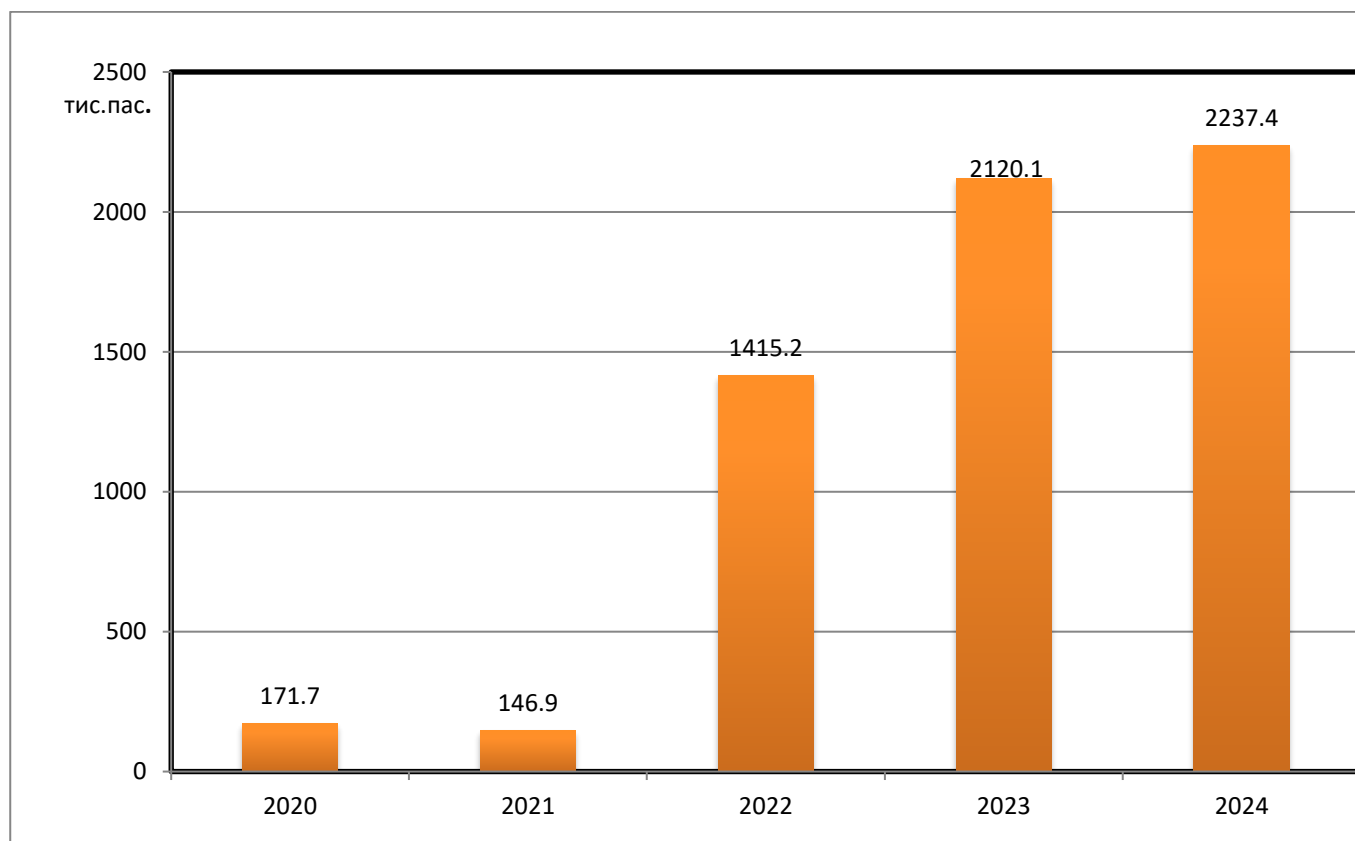


Рисунок 1.2 Динаміка кількості перевезених пасажирів АТ УЗ до країн ЄС за 2020-2024 роки

Також, варто зазначити, що після 2022 року значно збільшилась кількість перевезених пасажирів до країн ЄС. На кінець 2024 року перетнули кордон в бік ЄС залізничним транспортом 2,237 млн пасажирів, що майже в 1,5 рази більше ніж у 2022 році. Графічний аналіз кількості перевезених пасажирів АТ «Укрзалізниця» до країн ЄС за 2020-2024 роки наведений на рисунку 1.2 [2].

Окрім кількості перевезених пасажирів, ще одним важливим показником залізничних пасажирських перевезень є кількість рейсів пасажирських поїздів. Аналіз кількості рейсів поїздів різної категорії за 2018-2023 роки наведено на рисунку 1.3. Поїзди дальнього сполучення у 2023 році зробили 33186 рейсів, що на 27% відсотків більше ніж було зроблено ніж у 2022 році . Загальна кількість пар поїздів далекого сполучення також збільшилася, з 139 у 2022 році до 188 у 2023р.

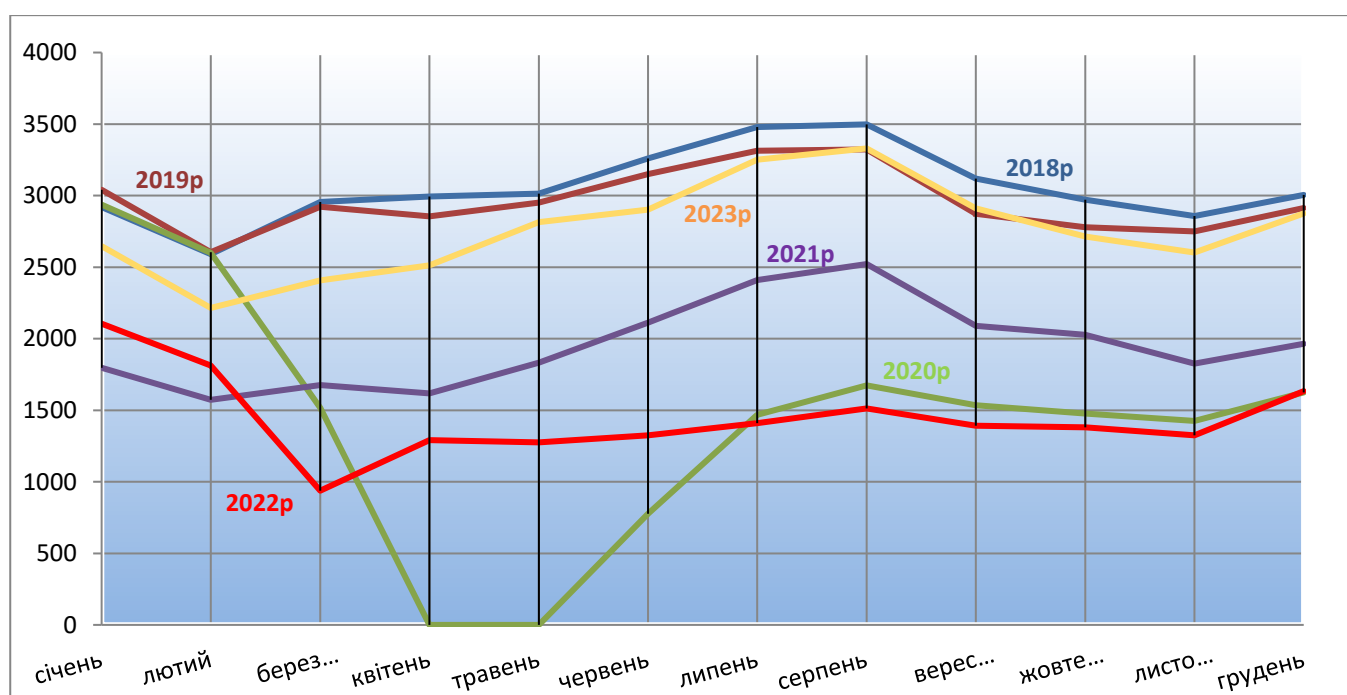


Рисунок 1.3 Динаміка кількості рейсів пасажирських поїздів дальнього сполучення за 2018-2023 роки

Наступним показником, який відіграє найважливішу роль при плануванні, організації та формування руху пасажирських поїздів є їх населеність, аналіз якої для поїздів далекого сполучення наведено на рисунку 1.4.

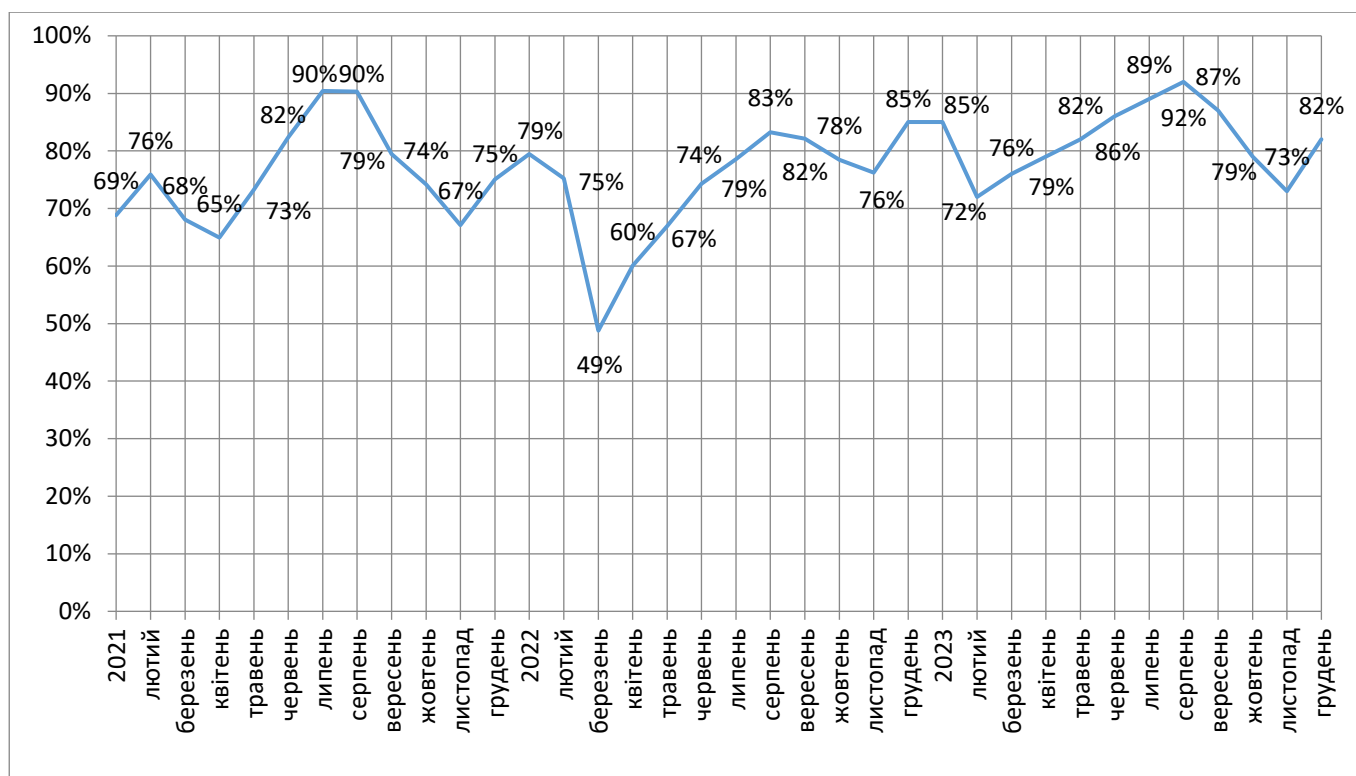


Рисунок 1.4 Динаміка навантаженості пасажирських поїздів дальнього сполучення у 2021-2023 роках.

Як бачимо, після початку широкомасштабної війни в Україні, також відбулося значене падіння рівня навантаженості пасажирських поїздів, проте до кінця 2022 року, ситуація стабілізувалася та майже набула таких значень, як і в довоєнний період. Для поїздів дальнього сполучення середня навантаженість за 2022 рік становила 74%, 2023 рік – 82%, проти 76 % у 2021 році.

1.3 Аналіз основних показників регіональних поїздів та поїздів філії УЗШК

В цьому підрозділі, було проведено аналіз основних показників регіональних поїздів та філії УЗШК аналогічно до поїздів далекого сполучення. Графічний аналіз загальної кількості перевезених пасажирів поїздами філії УЗШК та регіональними поїздами наведено на рисунках 1.5-1.6.

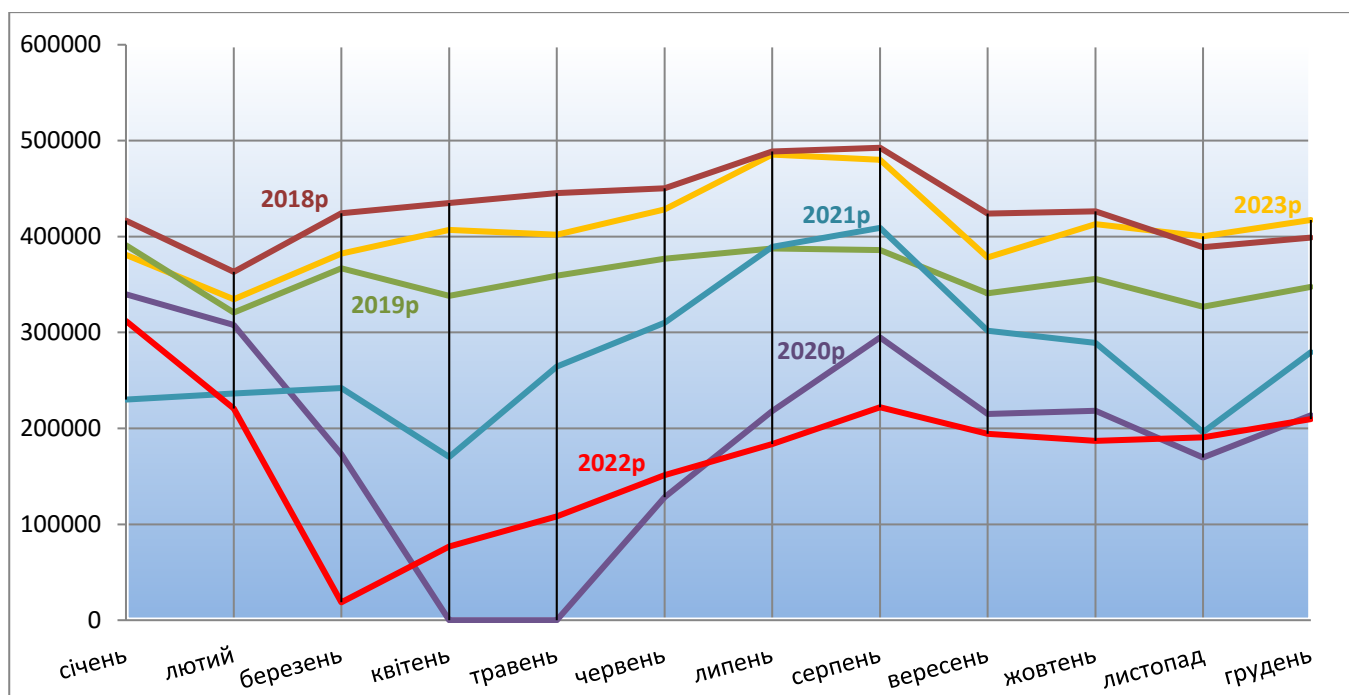


Рисунок 1.5 Динаміка кількості перевезених пасажирів поїздами УЗШК за 2018-2023 роки

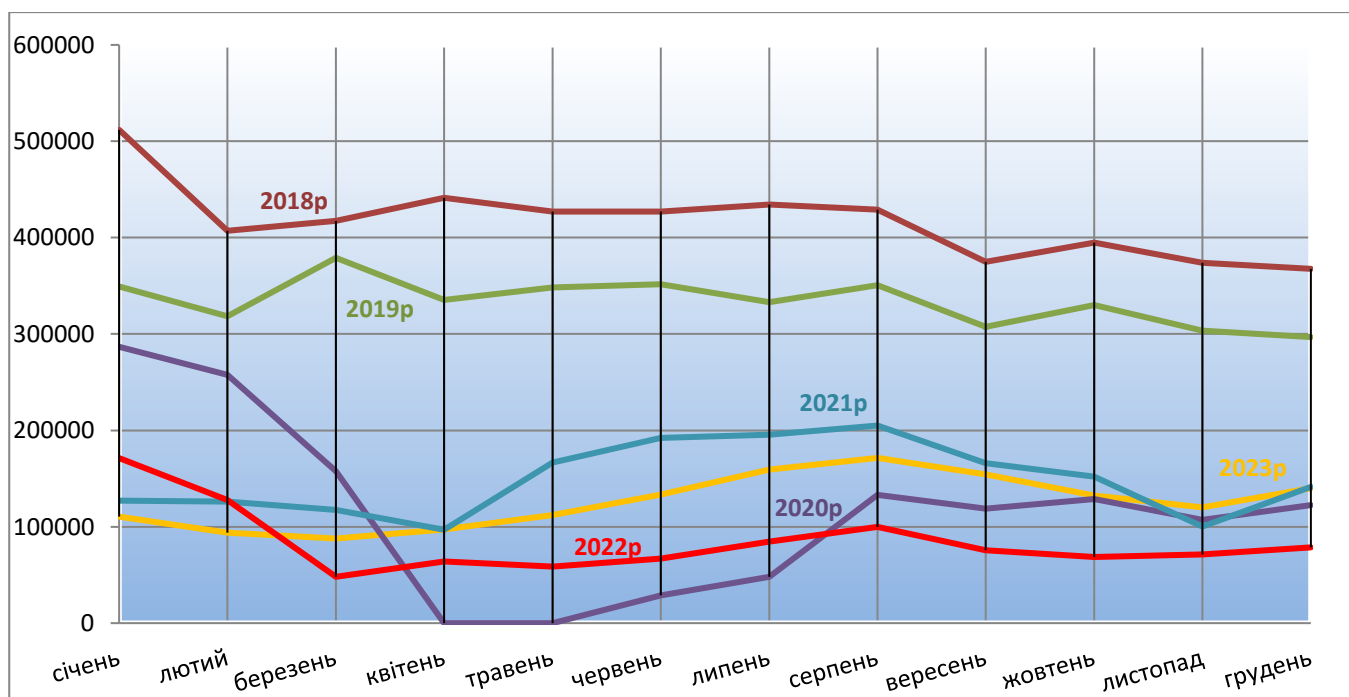


Рисунок 1.6 Динаміка кількості перевезених пасажирів регіональними поїздами за 2018-2023 роки

Як бачимо з наведеного графіку, аналогічно до поїздів далекого сполучення, початок повномасштабної війни Росії проти України викликав стрімке падіння рівня

пасажиropoтoкy, прoтe дo кінця 2022 рoкy, cитyaцiя cтaбiлiзувaлacя, a в 2023 рoцi, знoвy пoчaлacя пoзитивнa динaмiкa. Чacтки вiд зaгaльнoї кiлькocтi пepeвeзeних пacажирiв рeгioнaльними пoїздaми тa пoїздaми фiлiї УЗШК y 2022 тa 2023 рoкax, мaйжe нe змiнилиcя пo вiднoшeннy дo 2021 рoкy, вoни cтaнoвлять вiдпoвiднo 6% (2022 p.) тa 8% (2023 p.) прoти 7% y 2021 рoцi тa -12% (14%), прoти 14% y 2021 рoцi. Aнaлiз зaгaльнoї кiлькocтi пepeвeзeних пacажирiв пoїздaми рiзних кaтeгopiй бyлo нaвeдeнo y дoдaткy Б, a зaгaльнi чacтки пepeвeзeних пacажирiв в зaлeжнocтi вiд кaтeгopiй пoїздiв зa 2018-2023 рoки нaвeдeнi в дoдaткy В.

Кiлькicть рейciв пoїздiв фiлiї УЗШК тa рeгioнaльних пoїздiв нaвeдeнo нa риcункax 1.7-1.8.

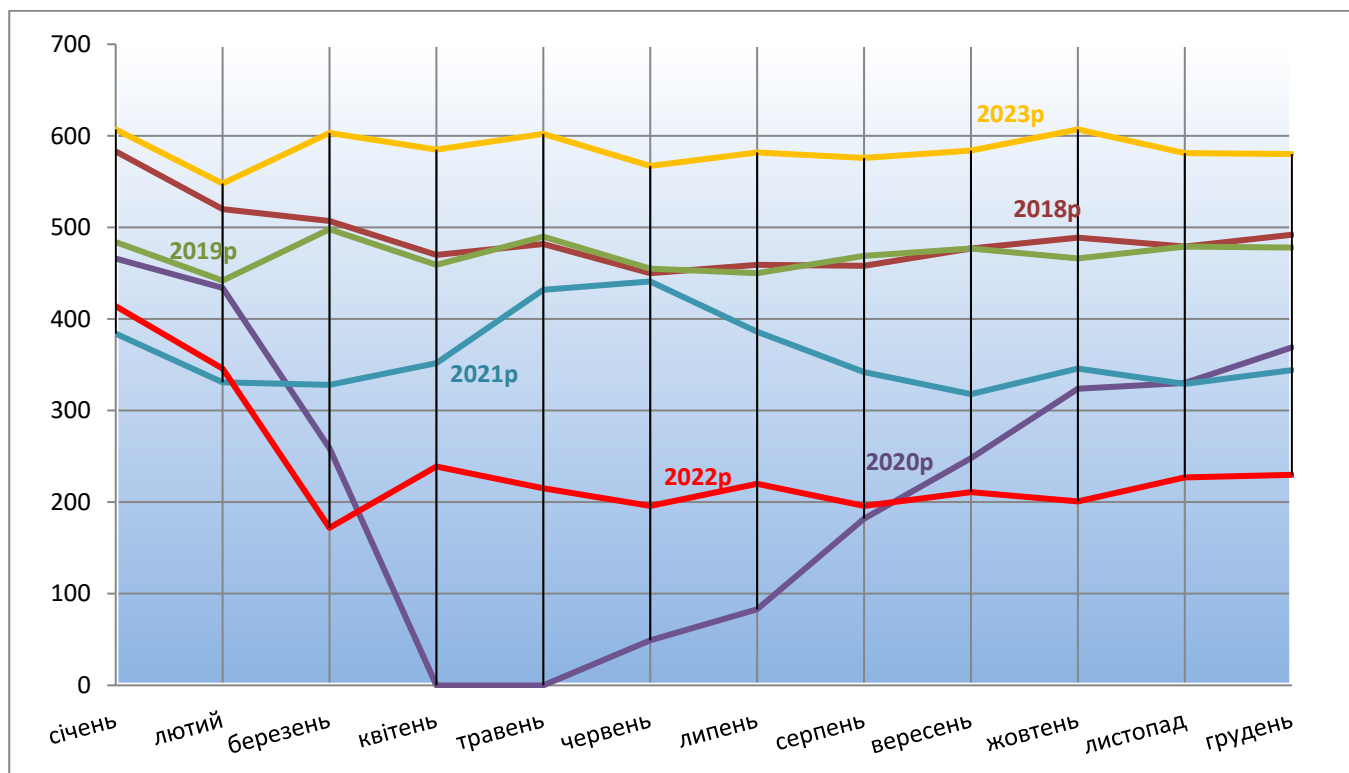


Рисунок 1.7 Динаміка кількості рейсів регіональних пасажирських поїздів за 2018-2023 роки

Вiдпoвiднo дo риcункiв 1.7-1.8, пoїзди фiлiї УЗШК y 2022 рoцi зрoбили 3298 рейciв, щo нa 18% мeншe, нiж y 2021 рoцi, тa 4716 рейси y 2023 рoцi, щo нa 21% бiльшe нiж y 2022.

Регіональні поїзди у 2022 році зробили 2867 рейсів, що на 34% менше ніж у 2021 році, а в 2023 році – 7022 рейси, що майже в 2,5 рази більше, ніж в попередньому році. Графічний аналіз загальної кількості рейсів пасажирських поїздів різних категорій було наведено у додатку Г.

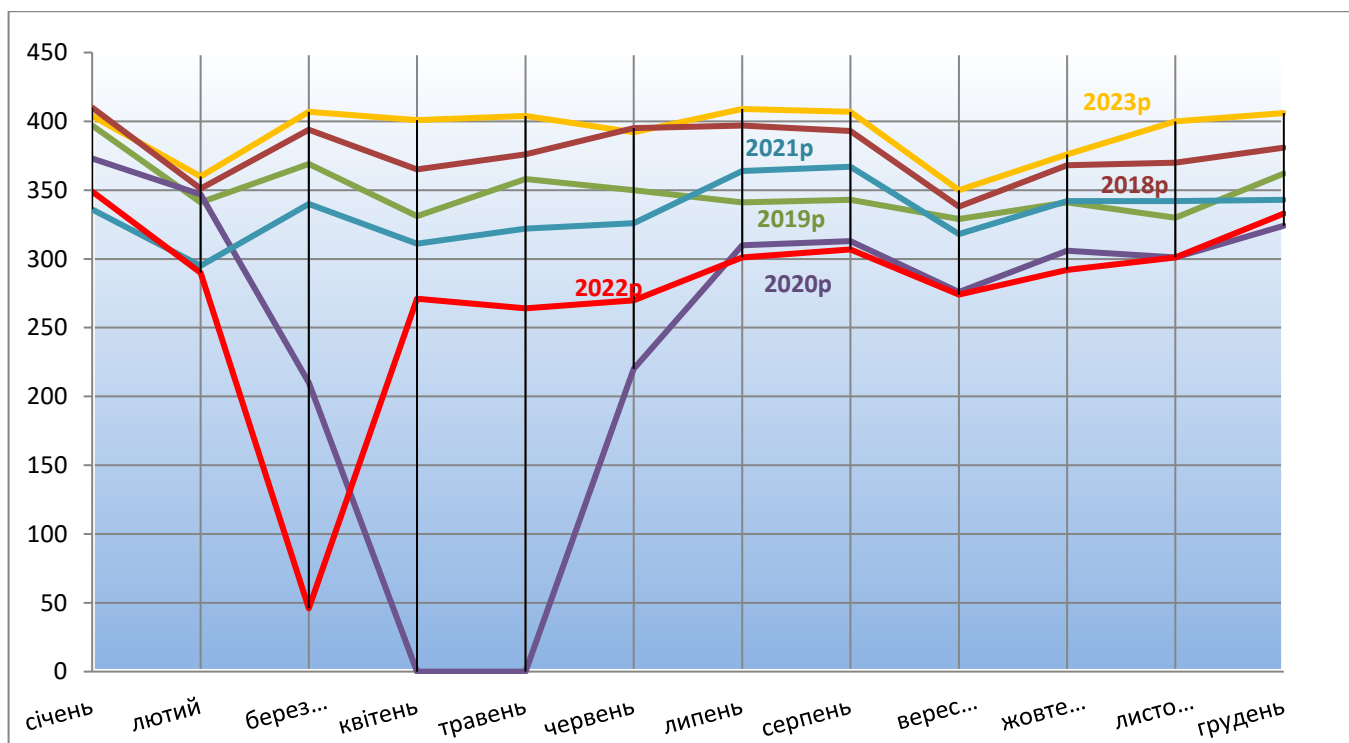


Рисунок 1.8 Динаміка кількості рейсів поїздів УЗШК за 2018-2023 роки

Наступним показником, аналіз якого було проведено у додатку Д, була кількість пар пасажирських поїздів за 2018-2023 роки. Так, у 2022-2023 роках пасажирських поїздів було сформовано 227 та 250 пар відповідно, проти 232 у 2021 році з яких 159 (2022 р.) та 201 (2023 р.) були поїздами далекого сполучення (188 у 2021 році), 45 та 19 філії УЗШК (16 у 2021 році), 23 та 25 регіональних (28 у 2021 році). Варто зазначити, що перевищення кількості пар поїздів філії УЗШК у 2022 році відбулося за рахунок створення одиничних евакуаційних поїздів різних напрямків, таких як поїзди №753 та №755 сполученням Харків- Львів або №797 сполученням Дніпро-Львів.

Також, було проаналізовано рівень населеності поїздів філії УЗШК та регіональних поїздів, що наведено на рисунках 1.9-1.10.

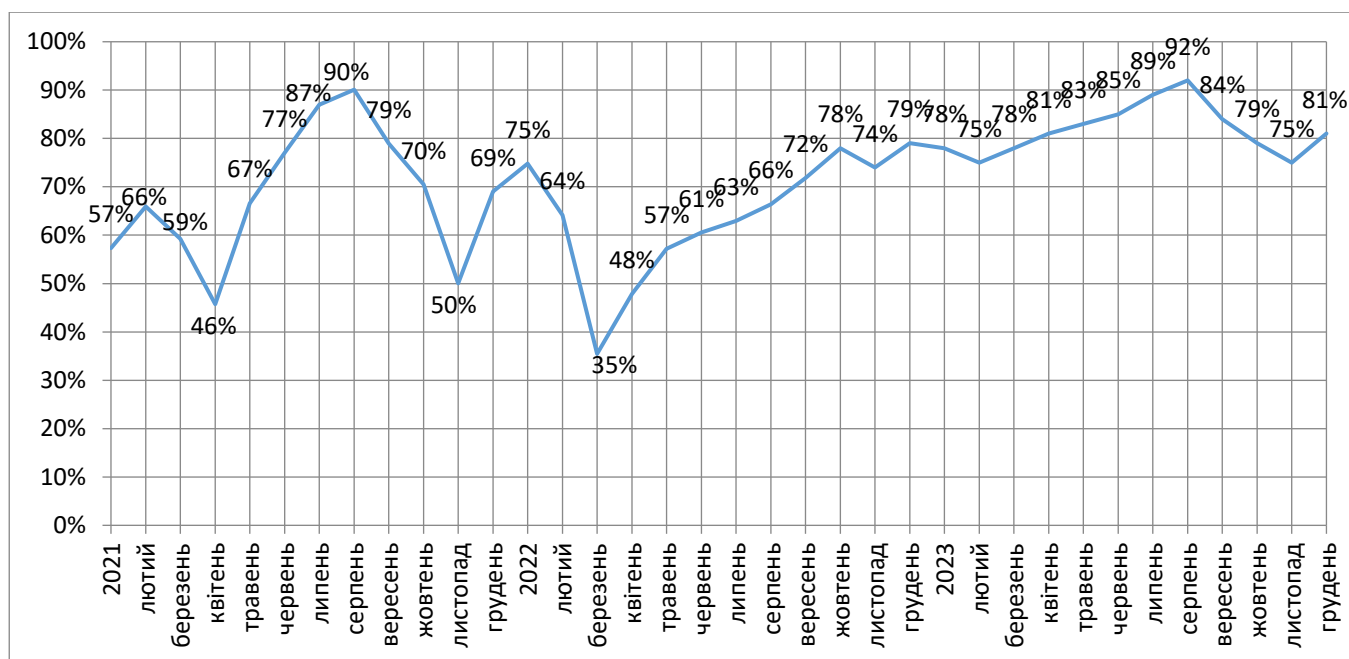


Рисунок 1.9 Динаміка населеності поїздів УЗШК у 2021-2023 роках

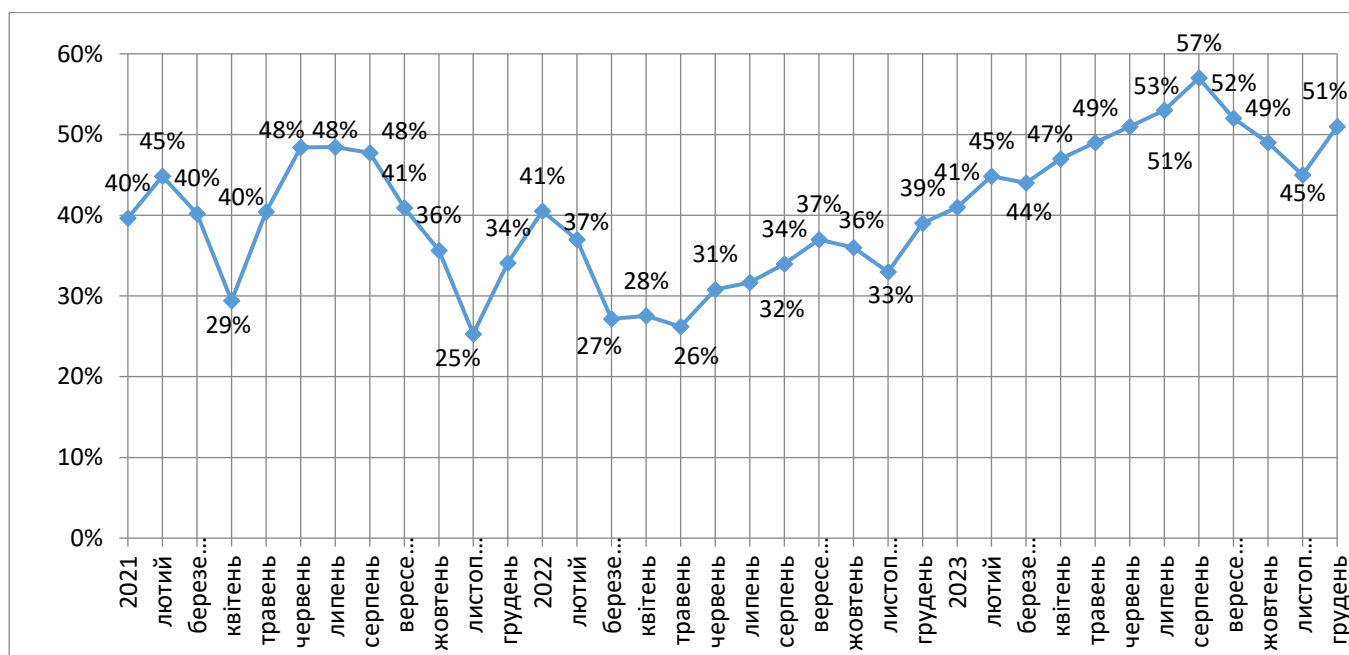


Рисунок 1.10 Динаміка населеності регіональних поїздів у 2021-2023 роках

Рівень населеності поїздів філії УЗШК та регіональних поїздів, аналогічно до поїздів дальнього сполучення після початку широкомасштабної війни в Україні мав значне падіння, проте до кінця 2022 року, ситуація стабілізувалася а в 2023 році набула таких значень, як і в довоєнний період. Для поїздів філії УЗШК у 2022 році середня населеність склала 64%, у 2023р. 82%, проти 68% у 2021 році, а для

регіональних поїздів середня населеність склала 33% (2022р.) та 49% (2023р.) проти 40% у 2021 році.

1.4 Аналіз досвіду удосконалення організації пасажирських перевезень

Важливість пасажирських залізничних перевезень лише підкреслюється їх виконаним обсягом поїздами всіх категорій. Залізниця стикається з великими викликами у сфері перевезень через конкуренцію з іншими видами транспорту, а також внаслідок проблем у власній системі, зокрема через періодичні відмови пов'язаних з ремонтними чи відбудовними роботами.

Проте, задля подальшого успішного конкурування з іншими видами транспорту, система залізничних пасажирських перевезень має бути адаптивною при будь-яких відмовах.

В свою чергу, адаптивність цієї системи може бути досягнута внаслідок використання підходів на основі теорії ризиків, прогнозування та моделювання пасажиропотоків, а також формування інтелектуальних систем управління або взаємодії різних видів транспорту.

Удосконаленням організації пасажирських перевезень в Україні займалися такі вчені, як Бауліна Г.С., Будник В.А., Вакарчук І.М., Вакуленко К.Є., Волохов В.А., Дейнека О.Г., Дикань В.Л., Дмитрієв М.М., Константинов Д.В., Левковець П.Р., Ломотько Д.В., Мороз М.М., Примаченко Г.О., Селебинка Ю.В., Устенко М.О., Шкуренко О.В. [21-30] та інші.

В науковій праці [22] було запропоновано вирішення проблеми забезпечення ефективності функціонування регіональних транспортних систем при взаємодії видів транспорту та використанні сучасні положення концепції логістики пасажирських перевезень.

В публікації [23] дослідниками було розроблено прикладні підходи до формування логістичної системи залізничного транспорту на території України.

В статті [24] науковцями було здійснено аналіз останніх досліджень щодо розвитку міської логістики, детально розглянутий логістичний принцип управління

якістю щодо пасажирських перевезень, а також проаналізовані методи визначення режимів руху та оцінки безпеки руху.

У роботі [25] авторами досліджено основні напрямки розвитку транспортної логістики, виділено як основні види загальної транспортної логістики, так і сфери залізничного транспорту, у якій логістика набуває домінуючого значення в умовах реформування. Також виділено головні функції транспортної логістики на підприємствах залізничного транспорту та обґрунтовано важливість інтегруючої функції в сучасних умовах розвитку.

В публікації [27] було запропоновано впровадження логістичних технологій у залізничному транспорті України для підвищення його ефективності, конкурентоспроможності та інтеграції у світову транспортну систему, що дозволить оптимізувати перевезення, знизити їхню вартість, покращити якість обслуговування та забезпечити координацію між видами транспорту.

В науковій роботі [30] проаналізовано умови, необхідні для формування залізнично-автобусних пасажирських перевезень за єдиним графіком, створено структурно-логічні схеми просування пасажиропотоку на транспортно-пересадочних вузлах при здійсненні пересадки за участю залізничного транспорту, а також запропоновано математичну модель узгодженого графіка руху пасажирських транспортних засобів.

Проте, в проаналізованих роботах [21-30], присвячених організації пасажирських перевезень, основна увага приділялася підвищенню ефективності регіональних транспортних систем та управлінню якістю руху. Було розроблено моделі для нормальних, стабільних умов функціонування транспорту, переважно у мирний час.

Також, у проаналізованих працях не було враховано можливість руйнування залізничної інфраструктури внаслідок надзвичайних ситуацій, зокрема військових дій, що значно змінює організаційні умови перевезень. Також відсутні рішення щодо оперативного планування альтернативних маршрутів для пасажирських поїздів у випадках раптового пошкодження мережі.

Дослідженню теорії ризиків та роботи залізничного транспорту в нестандартних умовах присвятили свої наукові праці багато вітчизняних вчених, такі як: Бутько Т.В., Воловельська І.В., Грінченко Є.М., Журавель К.В, Запара В.М., Запара Я.В., Карась О.О , Ковальов А.О., Кульова Д.О., Ломотько Д.В., Малахова О.А., Пархоменко Л.О., Продащук С.М, Прохоров В.М., Соколов Д.Л, Федоренко Р.М., Чехунов Д.М., Ящук Ю.І. [31-37] та інші.

У наукових працях [31,32] наведено класифікацію ризиків на залізничному транспорті, яка є важливим етапом ефективного управління ними, проведено моделювання і оцінку аварійного ризику при русі потягу з нафтопродуктами по визначеному маршруту, а також зроблено розрахунки по запропонованій методиці.

В статті [36] розглянуто та систематизовано шляхи становлення системи управління ризиками у світі та в Україні розглянуто періодизацію становлення системи управління ризиками для подальшої побудови методики мінімізації та нейтралізації внутрішніх та зовнішніх загроз підприємства на основі розробленого та реалізованого комплексу заходів економічного, правового та організаційного характеру з урахуванням особливостей та специфіки розвитку підприємств у сучасному світі.

В роботі [37] запропоновано підхід до вдосконалення функціонування залізничного пасажирського транспорту в умовах тривалих кризових ситуацій. Основна ідея полягає у використанні краудсорсингових даних про трафік для аналізу змін у транспортному попиті та ефективного управління пасажиропотоками.

Загалом, у наукових працях з управління ризиками на транспорті головний акцент зроблено на класифікації загальних ризиків, оцінці аварійних ризиків при транспортуванні небезпечних вантажів та розробці систем управління ризиками на підприємствах. При цьому питання ризику затримки пасажирських поїздів через пошкодження залізничної інфраструктури розглянуто недостатньо в частині можливої динамчної зміни стану системи внаслідок бойових дій.

Прогнозуванням та моделюванням пасажиропотоків займалися наступні вчені: Бутько Т.В., Балака Є.І., Вдовиченко В.В, Деревянко Т.О., Доля К.В., Доля О.Є., Левтеров А. І., Калашнікова Т.Ю, Козачок Л. М., Константінов Д.В., Кулакова М.В.,

Леснікова І. Ю., Пархоменко Л.О., Примаченко Г.О. Прогонюк І. В., Прохорченко А.В., Резуненко М. Є., Соколова, О. О. Халіпова., Н. В., Юсіфов С.В. [38-44] та інші.

Наукова праця [39] присвячена розв'язанню актуальної задачі удосконалення системи прогнозування пасажиропотоків в умовах планування пасажирських перевезень. Запропоновано комплексну модель прогнозування добового пасажиропотоку з перспективою на п'ять діб на основі нейро-нечітких мереж типу NEFPROX.

В публікації [41] був розроблений метод використання систем комп'ютерної математики для моделювання та прогнозування вхідних часових рядів, при виконанні якого здійснено програмування процесу вирішення та отримані результати адаптивного алгоритмічного моделювання залежностей пасажиропотоку від часу, що можуть бути використані для побудови розкладів руху роботи транспортних засобів при виконанні пасажирських перевезень громадським міським транспортом.

В роботі [42] була проведена прогнозна оцінка обсягів пасажирських перевезень в дальньому (залізничний транспорт) та міжміському (автомобільний транспорт) сполученні в короткостроковому періоді, на основі кореляційно-регресійних моделей для прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо подальшого розвитку транспортної галузі.

Наукове дослідження [44] присвячено розробленню процедури оптимізації математичної моделі, яка становить собою цільову функцію, що відображає оптимізаційні критерії, та систему технологічних обмежень.

Дослідження, присвячені прогнозуванню пасажиропотоків, зосереджувалися на створенні моделей прогнозування обсягів перевезень у стабільних умовах із використанням нейронних мереж, нечітких моделей або регресійних підходів. Прогнозування в попередніх роботах дійсно здійснювалося, однак використовувалися обмежені обсяги вхідних даних, переважно базові показники попередніх перевезень або сезонні чинники. Крім того, результати прогнозування здебільшого не інтегрувалися у процес прийняття оперативних рішень у випадках надзвичайних ситуацій або пошкодження інфраструктури.

Формуванням інтелектуальних систем управління або взаємодії різних видів транспорту в своїх наукових роботах займалися: Аулін, В. В., Бережна Н.Г, Бутько Т.В., Головатий А. О. Гриньків А. В., Жиленко Х.О., Запара В.М., Ключев С.О, Ковальов А.О., Кравець А.Л., Кудзієв М.В., Кузнецов Д.Г., Лозан О. М. Ломотько Д.В., Малахова О.А., Овсянніков Д.О., Огар О.М., Онищенко В.В., Павленко, О. С., Примаченко Г.О., Прохоров В.М., Романенко С.М., Рябоконь Є. О., Сігонін Ф.Є., Телепенько, А. О., Цимбал С.В. [45-53] та інші.

В статті [46] розглянуто значення та перспективи впровадження інтелектуальних транспортних систем (ІТС) для забезпечення стійкої мобільності та підвищення ефективності транспортних систем, а в науковій публікації [50] було проведено аналіз чинників, що впливають на попит на пасажирські перевезення залізничним транспортом.

В науковій публікації [53] було розглянуто значення інтелектуальних транспортних технологій, їхній вплив на розвиток транспортної інфраструктури, а також перспективи впровадження в Україні. Основну увагу приділено ролі інформаційних технологій у підвищенні безпеки, оптимізації транспортних процесів та забезпеченні стабільності й екологічності транспортної галузі.

Отже, у наукових працях, присвячених розвитку інтелектуальних транспортних систем [45-53], основна увага приділялася підвищенню ефективності транспортних мереж у стабільних умовах, забезпеченню стійкої мобільності населення, покращенню безпеки руху, оптимізації розкладів громадського транспорту та зменшенню негативного екологічного впливу.

Однак, у наявних дослідженнях відсутнє врахування сценаріїв роботи транспортних систем у надзвичайних умовах — при пошкодженні залізничної інфраструктури, порушенні сталого руху пасажирських поїздів, особливо у випадках впливу зовнішніх загроз, таких як бойові дії або природні катаклізми.

Безпосередньо формуванням альтернативних маршрутів присвячені роботи таких українських вчених: Бутько Т.В., Демчук І.А., Жуков, І. А., Запара В.М., Калембет, А. В., Кулакова, С. Ю., Кульова Д.О., Мартинова, О. П., Пархоменко Л.О.,

Подкопова, Д. Є., Прохоров В.М., Прохорченко А.В., Примаченко Г.О., Рева А.А. [54-57] та інші.

В роботі [54] було розглянуто методи розв'язання задач одношляхової й альтернативної маршрутизації, оцінки часу розв'язання задачі альтернативної маршрутизації відомими алгоритмами на обчислювальних машинах і паралельних обчислювальних структурах. Запропоновано системо-аналоговий метод побудови паралельних структур пошуку альтернативних маршрутів.

В науковій статті [57] запропоновано методику формування матриці альтернативних маршрутів громадського транспорту на основі транзакцій абонентів стільникового зв'язку. Вона ґрунтується на інформації про місце розташування зупинок громадського транспорту, антен мобільного зв'язку та радіусу їх дії.

У наукових роботах, що стосуються формування альтернативних маршрутів, розглядалися переважно питання пошуку маршрутів для вантажних перевезень або оптимізації громадського транспорту в містах. Відсутні були підходи до маршрутизації пасажирських поїздів при пошкодженні інфраструктури, з урахуванням особливостей залізничної мережі, обмежень пропускної спроможності та необхідності залучення допоміжного транспорту [54-57].

Окрім цього, на зазначені тематики існує багато наукових праць і закордонних вчених, таких як: Abduljabbar R., Bovy P., Budd L., Cetinkaya V., Domagała W., Fuchs S., Ganin A., Gidener N., Stern E., Wong W. [58-67] та інші.

Зокрема, у праці [58] розглядалося моделювання стійкості транспортних мереж до катастрофічних подій шляхом побудови маршрутів з урахуванням імовірності руйнування інфраструктурних елементів. У дослідженнях [60,61]- аналізувалися алгоритми пошуку альтернативних шляхів у системах із високим рівнем взаємозалежності елементів мережі. Інші автори пропонували використання великих даних для прогнозування транспортного попиту в реальному часі [64].

Водночас пряме перенесення цих підходів в умови нашої країни є обмеженим через низку особливостей: відсутність циклічного графіка руху пасажирських поїздів, нерівномірну щільність залізничної мережі, обмежену пропускну спроможність окремих ділянок та значний вплив бойових дій на інфраструктуру. Ці чинники

визначили необхідність розробки спеціалізованих моделей, адаптованих до реалій функціонування українського залізничного транспорту в умовах пошкодження інфраструктури.

Таким чином, аналіз останніх наукових досліджень та публікацій на тему удосконалення організації пасажирських залізничних перевезень в умовах пошкодження залізничної інфраструктури, а також пов'язаних із заданою темою показав, що, незважаючи на суттєві напрацювання у сферах організації пасажирських перевезень, управління ризиками на транспорті, прогнозування пасажиропотоків та впровадження інтелектуальних транспортних систем, існує низка істотних обмежень.

Зокрема, більшість досліджень орієнтована на стабільні умови функціонування транспорту і не враховує ризиків руйнування інфраструктури внаслідок надзвичайних подій, особливо військового характеру. У роботах недостатньо розроблено підходи до оперативного управління пасажирськими перевезеннями при частковому або повному пошкодженні залізничної мережі, відсутні моделі динамічної оцінки ризику в умовах бойових дій з урахуванням зміни зовнішніх умов.

Зарубіжні підходи, хоч і є цінними з наукової точки зору, також мають обмежене застосування через специфіку функціонування залізничного транспорту України, яка включає відсутність циклічного графіка руху, нерівномірну щільність мережі, обмежену пропускну спроможність та ризик військових руйнувань. Ці обставини зумовили необхідність розробки нових підходів, які реалізовані у межах даного дослідження шляхом створення моделі оцінки ризику затримок, оптимізації організації альтернативних маршрутів пасажирських поїздів та інтеграції прогнозних моделей пасажиропотоку у процес оперативного управління перевезеннями в кризових умовах.

Отже, запропоновані в дисертації методи, підходи та процедури мають вагоме значення для удосконалення організації пасажирських перевезень в умовах пошкодження залізничної інфраструктури, забезпечення безперервності руху поїздів, підвищення надійності роботи залізничного транспорту та підвищення рівня та якості обслуговування пасажирів.

1.5 Аналіз причин пошкодження залізничної інфраструктури.

Кожне пошкодження інфраструктури має певні соціальні, технічні та економічні наслідки. Проте, перед тим як переходити до наслідків, зупинимось більш детально на можливих причинах пошкодження залізничної інфраструктури.

Першою причиною, через яку залізнична інфраструктура може бути пошкоджена є природні катаклізми. До них можна віднести зсуви ґрунту, викликані сильними дощами або землетрусами, повені, снігові замети, тощо. Найбільш вразливими до цієї причини пошкодження залізничної інфраструктури є гірські райони. Гірські схили найбільш часто піддаються ерозії, що може спричинити зсуви ґрунту та каменепаді, мають високий рівень вологості та опадів, що може призвести до повеней та розмиву залізничних колій, а також мають найбільший рівень ризику щодо утворення снігових лавин. Такі руйнування вже неодноразово відбувалися на мережі українських залізниць [111].

Ще однією причиною пошкодження залізничної інфраструктури – є транспортні події. При чому найбільш сильні транспортні події (аварії або катастрофи), можуть викликати повне закриття певної ділянки. Це може бути розвал вантажу з порушенням або без габариту суміжної колії, зіткнення або схід поїздів, тощо. Таких подій, на мережі українських залізниць, нажаль, також було достатньо за останні декілька десятиків років. Одними з таких випадків є сход пасажирського поїзда сполученням Київ-Варшава 20.02.2023 року по станції Ковель та сход швидкісного поїзда категорії Інтерсіті+, сполученням Київ-Запоріжжя 29.03.2021 року [113]. В обох вказаних випадках, відбулося тимчасове закриття залізничних ділянок, а маршрути курсування інших поїздів через ці ділянки були змінені.

Наступною причиною пошкодження залізничної інфраструктури, яка, нажаль, є актуальною в даний час – це проведення військових бойових дій. Такий вид руйнування може бути викликаний через прямі удари по залізничних об'єктах або поблизу до них, а також внаслідок диверсійних дій та умисного пошкодження залізничних колій, мостів та інших об'єктів для порушення логістики супротивника. Найбільш вразливими в такому випадку є залізничні шляхи найбільш наближені до

зони бойових дій. Проте, можлива і руйнація в районах, що знаходяться на значній відстані від лінії бойового зіткнення. Прикладом такого руйнування є ракетний обстріл Хмельниччини 13 травня 2023 року, внаслідок якого маршрут прямування всіх пасажирських поїздів було змінено, а підвоз пасажирів відбувався за допомогою шаттлового руху та автомобільного транспорту.

Важливо також зазначити, що в умовах ведення бойових дій усі штучні споруди, розташовані на залізничних ділянках, розглядаються як критичні елементи інфраструктури. Їх руйнування має надзвичайно серйозні наслідки, оскільки, на відміну від пошкодження елементів верхньої будови колії, відновлення штучних споруд потребує значно більше часу, ресурсів та організаційних зусиль. Це, у свою чергу, може призвести до тривалого закриття залізничної ділянки, порушення стабільності перевізного процесу, збільшення витрат на реалізацію альтернативних маршрутів та зростання ризику втрати транспортної доступності окремих регіонів.

Окрім цього, можливе поєднання кількох вищеперерахованих причин. Яскравим прикладом є руйнування колії внаслідок підриву каховської ГЕС 6 липня 2023 року та швидкого відтоку води, внаслідок якого відбувся сильний зсув земляного полотна на ділянці Кривий-Ріг – Нікополь та закриття цієї ділянки на декілька діб.

Динаміка кількості випадків пошкодження залізничної інфраструктури із повним закриттям певної ділянки та сумарна тривалість закриття цих ділянок за 2020-2024 роки наведено на рис 1.11.

Як бачимо з наведеного рисунка, пошкодження залізничної інфраструктури може відбуватися не лише в період воєнного стану, а й в мирний час. У довоєнний період кількість руйнувань залишалася стабільно низькою на рівні 17–21 випадків на рік. У 2022 році кількість інцидентів зросла удвічі до 43 випадків, що співпало з початком повномасштабної збройної агресії. У 2023 році було зафіксовано 41 випадок руйнування, а у 2024 році їх кількість дещо зменшилася до 38. Середня тривалість на відновлення інфраструктури для кожного випадку руйнування становить 2-3 доби.

Статистику руйнувань, було взято з офіційних каналів АТ УЗ для поїздів дальнього сполучення та категорії Intercity+.

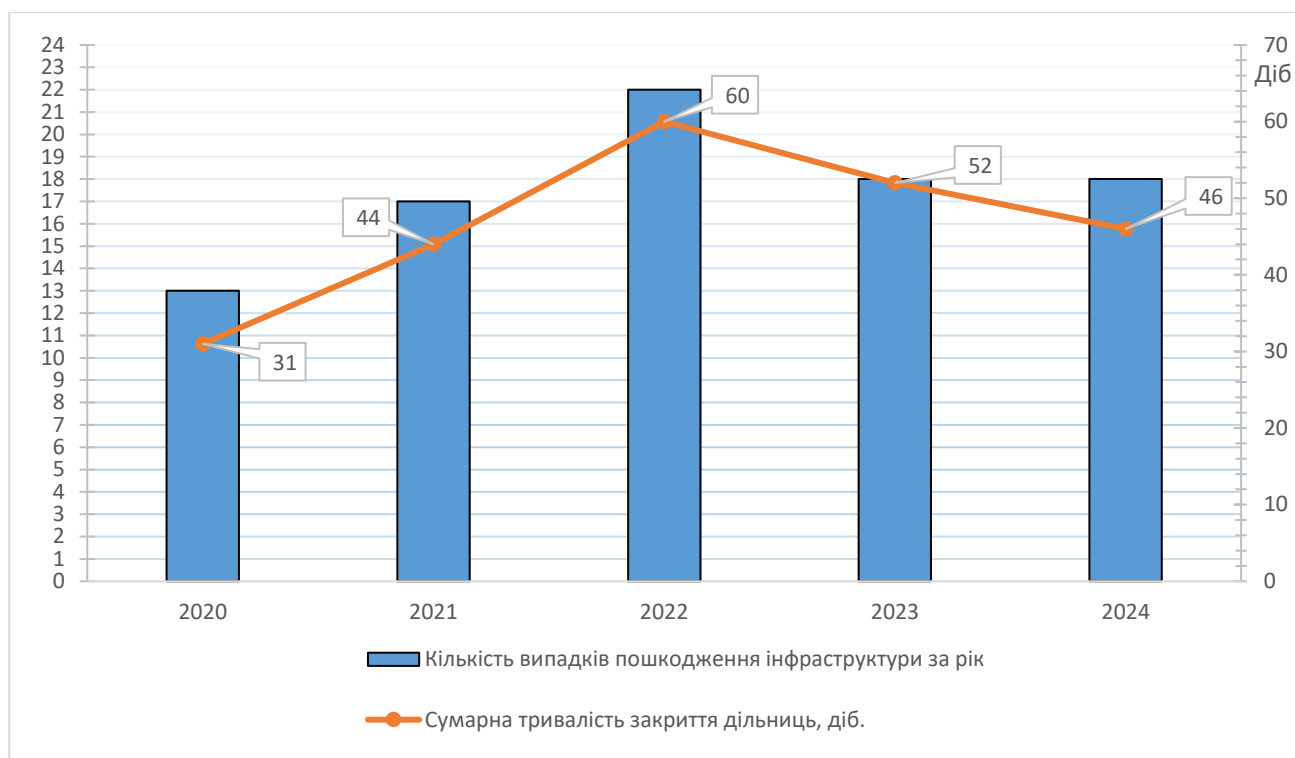


Рисунок 1.11- Динаміка кількості випадків пошкодження залізничної інфраструктури із повним закриттям певної дільниці та сумарна тривалість закриття цих дільниць за 2020-2024 роки.

З метою кількісної оцінки впливу кожного окремого фактора на загальну картину пошкодження залізничної інфраструктури було проведено відсотковий аналіз причин пошкодження залізничної інфраструктури. Розрахунок частки кожної причини у відсотковому еквіваленті дозволяє зрозуміти, які чинники мають найбільший вплив на працездатність залізничної мережі та потребують пріоритетної уваги при плануванні заходів щодо підвищення стійкості інфраструктури. Частковий аналіз причин пошкодження об'єктів транспортної інфраструктури наведено на рис 1.12.

З наведеного рисунку видно, що сумарний вплив бойових дій досягає понад 53%, що підтверджує провідну роль воєнних факторів у пошкодженні залізничної мережі у воєнний період.

Варто зазначити, що природні катаклізми, незважаючи на меншу частку, особливо в період мирного часу мають також суттєвий регіональний вплив, зокрема на територіях із підвищеним ризиком повеней або сейсмічної активності.

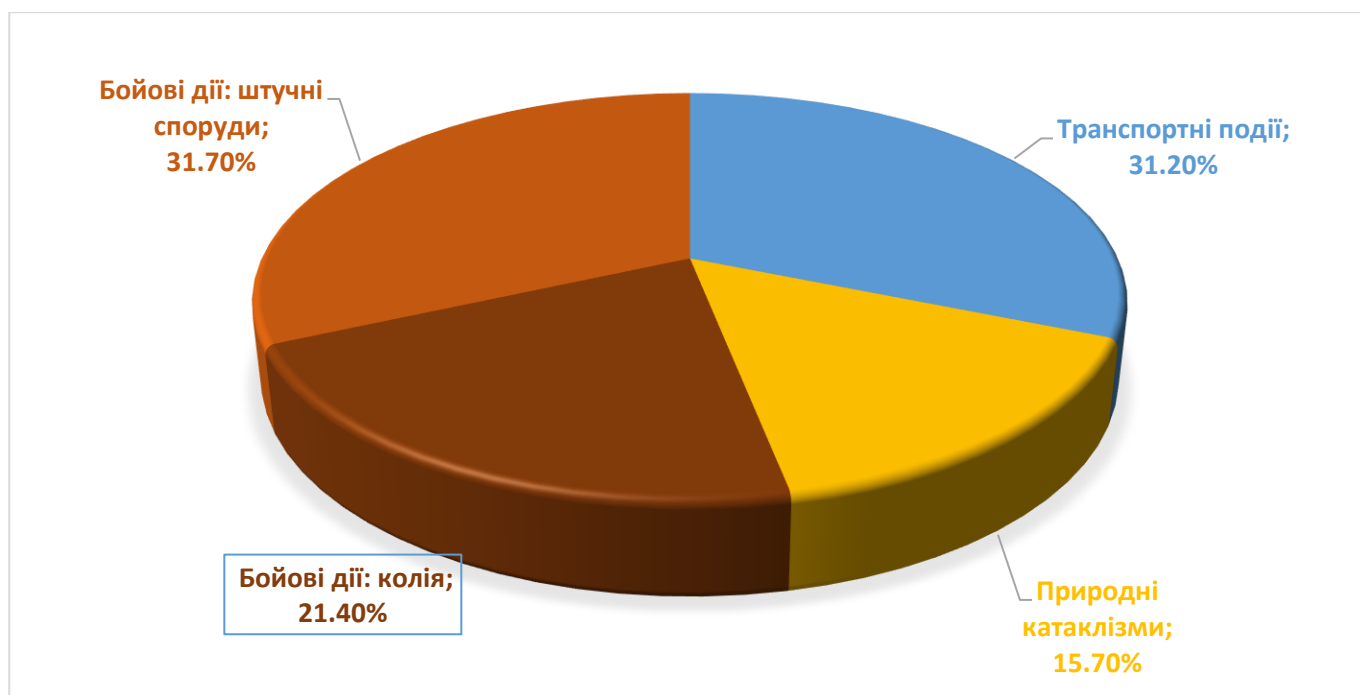


Рисунок 1.12- Аналіз часток причин пошкодження об'єктів транспортної інфраструктури

Аналіз часток причин пошкодження інфраструктури дозволяє ідентифікувати основні джерела загроз, однак для комплексного розуміння ситуації недостатньо лише знати структуру факторів ризику. Важливим аспектом є також вивчення часової динаміки пошкоджень, що дозволяє оцінити зміну інтенсивності впливу різних загроз упродовж досліджуваного періоду. З цією метою було проведено аналіз кількості пар пасажирських поїздів, які змушені були змінити свій маршрут у зв'язку з пошкодженням залізничної інфраструктури протягом 2020–2024 років результати якого наведено на рисунку 1.13

Аналіз цих даних дає змогу оцінити реальний вплив руйнувань на організацію руху пасажирських поїздів та визначити масштаби необхідних оперативних змін у транспортній системі в різні періоди. З наведеного рисунку видно, що починаючи з 2022 року, у зв'язку з початком активної фази бойових дій, спостерігається різке зростання кількості змінених маршрутів до 61 пари. Це свідчить про те, що пошкодження ключових залізничних ділянок стали системним явищем, яке змусило масово переорієнтовувати пасажирські потоки через альтернативні маршрути.

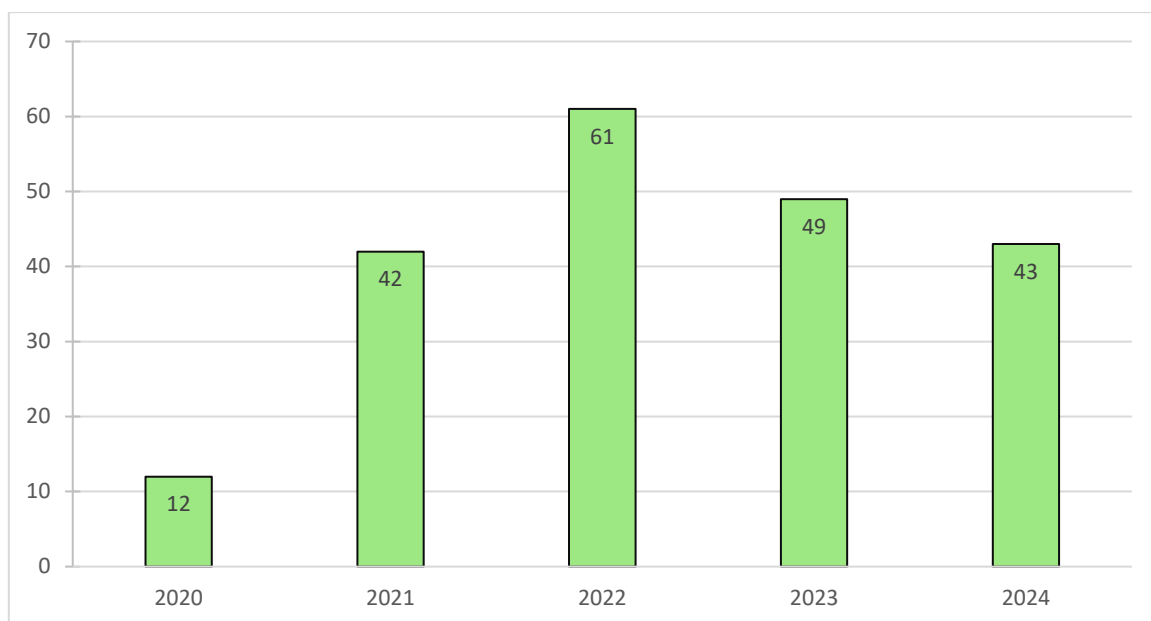


Рисунок 1.13 - Кількість пар поїздів, які вимушені були прямувати альтернативним маршрутом.

У 2023 році рівень змін залишається високим, що підтверджує тривалий характер впливу військових дій на залізничну мережу та її стійкість. У 2024 році відзначається певне зниження кількості змінених маршрутів до 43 пар, однак цей показник все ще залишається вищим за довоєнні значення у декілька разів. Це вказує на поступову адаптацію транспортної системи до нових умов, але також підкреслює, що інфраструктурні пошкодження все ще залишаються серйозною проблемою для стабільної організації пасажирських перевезень. Загальна кількість поїздів, що була вимушена прямувати альтернативними маршрутами становить 237 пар, що є достатньо високим показником, а правильна організація альтернативних маршрутів змогла б суттєво знизити рівень додаткових витрат.

Отримані результати свідчать про те, що пошкодження залізничної інфраструктури безпосередньо впливають на необхідність оперативної перебудови маршрутних схем руху поїздів, що вимагає додаткових витрат часу, ресурсів та зусиль на планування. Відповідно, для забезпечення безперервності перевезень необхідно передбачати гнучкі сценарії організації руху, можливість використання альтернативних шляхів, а також розробку адаптивних графіків руху у разі виникнення надзвичайних ситуацій.

1.6 Висновки до першого розділу

1. Проаналізовано стан та розвиток залізничних пасажирських перевезень та було визначено, що на сьогоднішній день, пасажирські перевезення в Україні забезпечуються лише автомобільним та залізничним транспортом. Автомобільний транспорт має ряд переваг над залізничним завдяки своїй гнучкості, доступності та частоті рейсів. Проте, варто відзначити, що залізничний транспорт також є достойним конкурентом, забезпечуючи комфорт, безпеку та можливість подорожі на великі відстані з високою швидкістю. Його мережа охоплює значну частину країни, забезпечуючи зручний доступ до багатьох населених пунктів. Таким чином, залізничний транспорт інколи може бути перевагою для пасажирів, які шукають комфортну і ефективну подорож на великі відстані.

Українська залізнична мережа є значущим компонентом транспортної інфраструктури країни, виконуючи важливу роль у забезпеченні пасажирських перевезень на різних рівнях: дальнього, регіонального і частково приміського сполучення. Зокрема, система залізничних перевезень стала критично важливою після подій з 24 лютого 2022 року, коли відбулися значні зміни в транспортній системі внаслідок повномасштабного вторгнення в Україну. Пасажирський залізничний транспорт не лише забезпечує зручний доступ до різних регіонів країни, але, також відіграє важливу роль у транспортуванні поранених військових та цивільних громадян, евакуації мирного населення та перевезенні високопоставлених осіб. В цей непростий час залізниця виявилася надійним і важливим засобом для забезпечення мобільності та безпеки громадян. На сьогоднішній день логістика пасажирських залізничних перевезень організована єдиним оператором АТ УЗ, в якому безпосередньо за організацію пасажирських перевезень відповідають філії ПК та УЗШК.

2. Проаналізовано динаміку основних показників роботи поїздів категорій Intercity+, дальнього та регіонального сполучення, який показав, що кількість перевезених пасажирів під час дії військового стану скоротилася порівняно з довоєнними роками, проте залишалася на досить високому рівні. Окремо варто

відзначити досягнення рекордних обсягів перевезень у напрямку країн Європейського Союзу. Згідно з результатами графічного аналізу, були зафіксовані зміни у структурі пасажиропотоків та рівні населеності поїздів, однак залізничний транспорт України зміг оперативно адаптуватися до нових умов і відновити певну стабільність до кінця звітного періоду. Це свідчить про високий рівень організаційної та технічної готовності залізничної галузі навіть в умовах надзвичайних ситуацій.

Проте, для більш повного розуміння процесів, що відбуваються у сфері пасажирських перевезень, необхідно провести детальний аналіз пасажиропотоків за основними напрямками. Проведення такого аналізу дозволить виявити особливості зміни попиту на перевезення у різних регіонах і забезпечить основу для побудови достовірних моделей прогнозування пасажиропотоків. Інтеграція результатів прогнозування у подальше моделювання перевізного процесу сприятиме підвищенню ефективності планування маршрутної мережі, оптимізації ресурсів та забезпеченню надійного функціонування залізничного транспорту в умовах як стабільного розвитку, так і можливих кризових ситуацій.

3. Було визначено, що наукові дослідження присвячені організації пасажирських залізничних перевезень, управлінню ризиками, прогнозуванню пасажиропотоків, розвитку інтелектуальних транспортних систем та формуванню альтернативних маршрутів, показав, що існуючі наукові напрацювання недостатньо враховують можливість пошкодження залізничної інфраструктури внаслідок надзвичайних ситуацій, зокрема бойових дій, що суттєво змінює організаційні умови перевезень та підвищує рівень невизначеності у роботі транспортної системи. Зарубіжні дослідження, попри високу наукову цінність, мають обмежене застосування в умовах української залізничної мережі через специфіку її функціонування, нерівномірну густоту інфраструктури, відсутність стабільного циклічного графіка руху пасажирських поїздів та вплив бойових дій.

Таким чином, виявлено наукову прогалину, що полягає у відсутності методик оперативного планування пасажирських перевезень в умовах пошкодження інфраструктури, у браку моделей оцінки динамічного ризику затримок через руйнування об'єктів залізничної мережі та у нестачі інтегрованих рішень, що

поєднують прогнозування пасажиропотоків із формуванням оптимальних альтернативних маршрутів.

У цьому контексті актуальність проведеного дослідження полягає у створенні нових методів, моделей та підходів, спрямованих на забезпечення безперервності пасажирських перевезень в умовах пошкодження залізничної інфраструктури, що дозволить підвищити стійкість залізничної транспортної системи та забезпечити високу якість обслуговування пасажирів навіть у кризових ситуаціях.

4. Проведений аналіз причин пошкодження залізничної інфраструктури засвідчив, що кожна з них має специфічний характер впливу на стабільність перевізного процесу. Виявлено, що основними чинниками пошкоджень є природні катаклізми, транспортні події та військові дії, кожен із яких має власні особливості виникнення та масштаби наслідків. Особливу загрозу для залізничної мережі в сучасних умовах становлять бойові дії, які відповідно до проведеного відсоткового аналізу є причиною понад 53% усіх випадків пошкодження інфраструктури. Отримані результати показали, що при плануванні та організації пасажирських перевезень необхідно також враховувати ризики пошкодження інфраструктури.

РОЗДІЛ 2

ФОРМУВАННЯ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ПАСАЖИРОПОТОКІВ НА ГРАФІКОВИХ ЗУПИНКАХ

2.1 Прогнозування пасажиропотоків на графікових зупинках

Життєдіяльність суспільства будь-якої країни не може існувати без транспортного обслуговування, оскільки, в кожній державі, транспорт є зв'язуючим ланцюгом між різними за розмірами населеними пунктами. Динамічність подій, що відбуваються в політичному, соціальному та економічному житті багатьох різних країн приводить до зростання темпів міграційної активності населення.

Для того щоб певна людина могла дістатися необхідного їй населеного пункту, зокрема який знаходиться на великій відстані від неї, вона мусить використати хоча б одним з існуючих елементів даного ланцюга. Кожна людина, яка хоча б раз скористалася послугами транспорту – автоматично становиться пасажиром, а сукупність пасажирів, що рухаються в одному напрямку перетворюється на пасажиропотоки [16].

Прогнозування пасажиропотоків залишається перманентно актуальним, оскільки умови ринкових відносин унеможливають будь-які форми і методи директивного управління з боку держави. Достовірні прогностичні оцінки стають єдиним підґрунтям для раціонального виділення та розподілу матеріальних і фінансових ресурсів при розробці короткострокових та середньострокових планів роботи пасажирського комплексу, оптимізації обсягів і структури як державних, так і приватних інвестиційних залучень в цей сегмент транспортної галузі [37].

У сучасних економічних умовах пасажирському господарству необхідно вирішувати складні проблеми адаптації до роботи в умовах розвитку та удосконалення ринку транспортних послуг, знаходити більш ефективні технології організації процесу перевезення та методи їх реалізації [38]. Точне прогнозування пасажиропотоку досить складне через хаотичний характер транспортної системи та механізм впливу безлічі факторів [39].

Пасажиropотік має нелінійну характеристику та яскраво виражену сезонну тенденцію, а його спалах є основною причиною перевантаженості будь-якого виду транспорту [40]. Тому, реалізація системи прогнозування пасажиропотоків має бути заснована на методиці, що враховує нечіткість вхідної інформації і має можливість адаптації в короткотермінові строки [10]. У зв'язку з цим, точний прогноз пасажиропотоку заздалегідь полегшить диспетчерській службі організацію пасажирських перевезень [36].

У дисертаційній роботі було взято безпосередньо прогнозування кількості пасажирів, які здійснюють посадку та висадку на графікових зупинках, яка основою для подальших розрахунків пасажиропотоків на окремих ділянках залізничної мережі. Знаючи обсяги посадки та висадки на кожній зупинці, можна оперативно та з високою точністю обчислити реальні пасажиропотоки між станціями, що є критично важливим для планування навантаження на інфраструктуру та розробки ефективних схем руху.

Отримані прогнозні дані також дадуть змогу обґрунтовано прийняти рішення щодо доцільності подальшого прямування поїзда альтернативним маршрутом. Також, можлива організація додаткового транспорту для підвозу пасажирів у разі пошкодження інфраструктури, повинно базуватися саме на прогнозованих обсягах пасажиропотоків на графікових зупинках.

Таким чином, використання детальних прогнозів кількості посадки та висадки пасажирів є ключовим чинником для забезпечення гнучкості та стійкості організації пасажирських залізничних перевезень в умовах підвищеного ризику. визначати необхідну кількість рухомого складу для забезпечення перевезень на кожному маршруті [6].

2.2 Визначення найбільш оптимального методу прогнозування пасажиропотоків

Прогнозування пасажиропотоків включає використання різних методів, кожен з яких має свої унікальні особливості, переваги та недоліки. Кожен метод підходить

для певних умов і типів даних, що дозволяє обирати найефективніший підхід залежно від конкретної ситуації. У цьому підрозділі ми детально розглянемо кожен з основних методів прогнозування пасажиропотоків, надаючи ґрунтовне пояснення принципів їх роботи, переваг, недоліків та умов, за яких вони найбільш ефективні. Це допоможе зрозуміти, який метод прогнозування найбільш доцільний для досягнення максимальної точності і надійності прогнозів при прогнозуванні пасажиропотоків.

Першою групою методів прогнозування є екстраполяційні методи. До них відносяться метод трендового аналізу та сезонних моделей. Трендовий аналіз є одним з найпростіших і найпоширеніших методів екстраполяції, який використовується для прогнозування пасажиропотоків. Він базується на виявленні та аналізі основних тенденцій у часових рядах даних. Основна ідея полягає у виявленні загальної тенденції (тренду) для заданих даних. Тренд може бути зростаючим, спадаючим або стабільним. Після виявлення тренду його продовжують на певний період, щоб спрогнозувати майбутні значення [54,66].

Перевагами цього методу є простота і швидкість реалізації, а також можливість швидкого отримання попередніх прогнозів. До недоліків цього методу можна віднести: обмеженість у випадках складних і нелінійних даних, ігнорування впливу зовнішніх факторів (економічних, соціальних, тощо) та низька точність у довгострокових прогнозах при змінних трендах. Трендовий аналіз є корисним інструментом для швидкого та попереднього прогнозування пасажиропотоків, особливо коли немає доступу до детальних даних або ресурсів для використання складніших методів [58].

Метод сезонних моделей є важливим інструментом для прогнозування пасажиропотоків, особливо коли дані мають регулярні коливання в певні періоди часу, такі як дні тижня, місяці або пори року, тощо. Сезонні моделі дозволяють враховувати певні цикли для більш точного прогнозування. При виконанні прогнозування цим методом, спочатку відбувається ідентифікація регулярних або повторюваних змін у даних, які відбуваються у певні періоди. Потім починається процес розбиття часових рядів на компоненти такі як: тренд, сезонність і випадкові

коливання. Після чого відбувається використання сезонних компонентів для створення моделі, яка може враховувати як сезонні, так і трендові складові.

Перевагами цього методу є можливість враховувати регулярні сезонні коливання, а також підвищена точність прогнозів для даних з вираженою сезонністю. До недоліків можна віднести те, що цей метод вимагає тривалих часових рядів для виявлення сезонних циклів та може бути менш точними для даних з нерегулярною сезонністю або за наявності великих випадкових коливань. Сезонні моделі є потужним інструментом для прогнозування пасажиропотоків у випадках, коли дані мають регулярні коливання, що повторюються в певні періоди часу. Вони дозволяють враховувати як сезонні, так і трендові складові, забезпечуючи більш точні прогнози.

Наступним методом є метод регресійного аналізу, який в свою чергу відноситься до групи каузальних методів. Регресійний аналіз є одним з основних методів вивчення взаємозв'язків між змінними. Він дозволяє визначити, як зміна однієї або кількох незалежних змінних (факторів) впливає на залежну змінну (результат). [42,78]. У контексті прогнозування пасажиропотоків, регресійний аналіз допомагає зрозуміти, як різні фактори, такі як ціна квитка, дохід населення, сезонні коливання, впливають на кількість пасажирів.

Робота цього методу починається зі збору достатнього обсягу даних про пасажиропотоки і фактори, що на них впливають. Після чого відбувається попередня обробка даних, а саме чищення даних від аномалій, заповнення пропущених значень та нормалізація змінних. Потім обирається тип регресійної моделі залежно від природи даних і поставленої задачі.

Наступним етапом є оцінка параметрів моделі за допомогою використання методу найменших квадратів або інших методів. Після чого проводиться аналіз результатів за допомогою таких показників як коефіцієнт детермінації, середньоквадратичне відхилення та середня абсолютна похибка. Після проведення цього аналізу відбувається безпосередньо прогнозування майбутніх значень залежної змінної [75].

Перевагами цього методу є: простота і зрозумілість моделі, особливо для лінійної регресії; можливість кількісно оцінити вплив різних факторів на залежну змінну; широке застосування в різних галузях і для різних типів даних.

Проте цей метод має і ряд недоліків таких як: чутливість до мультиколінеарності (високої кореляції між незалежними змінними); лінійні моделі можуть бути неадекватними для складніших взаємозв'язків; можливість отримання зміщених оцінок при наявності аномалій або пропущених даних. Регресійний аналіз є потужним і гнучким інструментом для моделювання і прогнозування, дозволяючи враховувати різні фактори і їх вплив на залежну змінну. Правильне використання цього методу дозволяє отримувати точні і надійні прогнози, що є важливим для ефективного управління і планування в багатьох сферах, включаючи транспортні системи.

Ще однією категорією, методів, які використовуються для прогнозування – є колективні експертні методи, які ґрунтуються на виявленні колективної думки експертів щодо перспектив розвитку об'єкта прогнозування. Загальні принципи методів колективної експертної оцінки для розроблення прогнозів полягають у визначенні погодженості думок експертів щодо напрямів розвитку прогнозованого об'єкта в майбутньому.

Найпоширенішим методом колективної експертної оцінки в останні роки – є метод Дельфі. Він розроблений американською корпорацією RAND у 1964 р. Характерною рисою методу «Дельфі», що відрізняє його від інших методів, є анонімність експертів і неодноразовість проведених опитувань. Анонімність полягає в тому, що при опитуванні учасники експертної групи невідомі один одному. Опитування здійснюється шляхом заповнення експертами анкет, у яких сформульовано питання. При цьому взаємодія членів експертної групи при заповненні анкет цілком виключається.

Метод «Дельфі» дозволяє виявити переважні судження спеціалістів (експертів) про розвиток об'єкта в майбутньому, виключаючи їхні прямі контакти і дебати між собою, але даючи можливість їм оцінювати свої доводи з урахуванням відповідей і доказів колег. Після кожного туру учасники експертизи переглядають свої оцінки й

обґрунтовують причини своєї незгоди з колективним судженням. У результаті відбувається звуження діапазону оцінок експертів. Недоліком методу «Дельфі» є неможливість виключення впливу на експертів з боку організаторів опитування при упорядкуванні анкет [108].

Також, часто для прогнозування пасажиропотоків використовуються методи машинного навчання, основним з яких є метод нейронних мереж [109]. Метод нейронних мереж є однією з провідних технологій у сфері машинного навчання та штучного інтелекту, що знаходить широке застосування в різних галузях, включаючи прогнозування пасажиропотоків. Цей метод базується на математичній моделі, яка імітує роботу біологічних нейронних мереж людського мозку [41].

Основний принцип роботи полягає в тому, що нейронна мережа складається з окремих нейронів, організованих у шари: вхідний шар, один або більше прихованих шарів і вихідний шар. Кожен зв'язок між нейронами має вагу, яка коригується під час навчання. Крім того, нейрони можуть мати певне зміщення, що додаються до значення нейрона. Нейрони використовують функції активації для обчислення вихідного сигналу на основі вхідного. Найбільш поширеними функціями є сигмоїдна або тангенсова. Процес навчання нейронної мережі включає налаштування ваг та зміщення шляхом мінімізації різниці між фактичними та прогнозованими результатами (зазвичай методом зворотного поширення помилки)[5,6].

Перевагами цього методу є:

- Можливість досягнення високої точності в прогнозуванні, особливо при роботі з великими обсягами даних.
- Можливість навчатися на різних типах даних і адаптуватися до змін у даних, що дозволяє ефективно використовувати їх у динамічних системах.
- Висока ефективність при роботі з неструктурованими даними.
- Здатність автоматично виявляти важливі ознаки та схожості у даних без потреби в ручному виборі параметрів

Недоліками методу нейронних мереж є:

- Необхідність великих обсягів навчальних даних для досягнення високої точності.

- Тренування глибоких нейронних мереж може бути дуже вимогливим до обчислювальних ресурсів.
- Моделі нейронних мереж часто складні для інтерпретації, що може ускладнити пояснення результатів і прийняття рішень на основі моделі.
- Потреба ретельного налаштування гіперпараметрів, таких як кількість шарів, кількість нейронів у кожному шарі, швидкість навчання тощо

Метод нейронних мереж є ефективним інструментом для прогнозування пасажиропотоків, здатним обробляти великі обсяги даних і виявляти складні патерни. Однак, його застосування вимагає значних обчислювальних ресурсів та ретельного налаштування, а також забезпечення великих обсягів якісних даних для навчання.

Таким чином, зважаючи на високу точність, здатність автоматично виявляти ознаки, ефективну роботу з великими обсягами даних, гнучкість і можливість тестування сценаріїв, нейронні мережі є найбільш підходящим методом для прогнозування пасажиропотоків у сучасному складному і динамічному середовищі. Інші методи, хоч і можуть бути корисними в певних контекстах, але не можуть забезпечити такого рівня деталізації і адаптивності, як нейронні мережі.

2.3 Визначення найбільш перспективного напрямку пасажирських перевезень в Україні

Україна – велика країна з різноманітними географічними регіонами які мають різні умови. Наприклад, гірські райони Карпат вимагають спеціального підходу до організації перевезень, такі як зменшення максимально дозволеної швидкості руху через наявність кривих меншого радіусу або залучення додаткового локомотива-штовхача для пасажирських поїздів з кількістю вагонів, що перевищує відповідну норму.

Окрім цього, деякі регіони нашої країни є віддаленими і мають меншу транспортну доступність, що впливає на частоту та тривалість рейсів. Якщо ж подивитись з точки зору економічного фактору, то різні регіони мають різний рівень економічної активності та різні потреби в перевезеннях. Наприклад, промислові

регіони потребують більшої кількості вантажних перевезень, що впливає на розклад пасажирських поїздів. Соціальний аспект також має свій вплив. Так, нерівномірний розподіл населення по Україні створює різні потоки пасажирів. У великих містах, таких як Київ, Харків, Одеса, пасажиропотік значно вищий, ніж у менших містах або сільських районах.

Не є виключенням також наявність певних туристичних напрямків, які мають виражену сезонність, наприклад, літні поїздки до курортних міст Чорного моря або зимові до гірськолижних курортів, що потребує гнучкого підходу до організації рейсів. Важливий вплив також мають певні інфраструктурні особливості.

Різний стан залізничних шляхів або наявність електрифікації може значно впливати на швидкість та безпеку руху поїздів, а великі транспортні вузли, такі як Київ, Львів або Харків, мають іншу логістику та управління перевезеннями порівняно з менш завантаженими станціями.

Таким чином, враховуючи ці фактори, логістику пасажирських залізничних перевезень доцільно розділяти за окремими напрямками. Розподіл за напрямками забезпечить більш ефективне, гнучке та відповідне до місцевих умов обслуговування, а також краще розуміння потреб пасажирів у конкретному регіоні та більш ефективне реагування на їхні запити. Графічний аналіз кількості перевезених пасажирів за напрямками поїздами дальнього сполучення наведений в додатку Е. [18]

Варто зазначити, що назва кожного напрямку відповідає регіональній філії, в межах якої знаходиться кінцева станція маршруту слідування кожного пасажирського поїзда. Відповідно, кількість перевезених пасажирів за кожним напрямком є сумою кількості перевезених пасажирів в бік регіональної філії в межах якої знаходиться кінцева станція маршруту прямування кожного поїзда.

Як бачимо з додатку Е, найбільш популярним напрямком за 2022-2023 роки став Львівський напрямок, проти Київського у 2021 році. Такий результат виявився цілком очікуваним, оскільки враховуючи характер ведення бойових дій на території нашої держави, львівський напрямок був єдиним для евакуації населення.

Аналогічно, було проведено аналіз за напрямками кількості перевезених пасажирів та рівня населеності для поїздів категорії Intercity та Intercity+ філії УЗШК.

Проте, для поїздів філії УЗШК, оскільки вони мають централізовані маршрути до Києва та всі обслуговуються в єдиному депо Дарниця, аналіз слідування пасажирів за напрямками було розділено на дві частини. Перша – це аналіз пасажиропотоку поїздів, які сліднують в прямому напрямку (в напрямку від Києва, Додаток Ж, рис. Ж.1). Друга частина являє собою кількість перевезених пасажирів прямуючих у зворотному напрямку (до Києва, Додаток Ж, рис. Ж.2). Після чого було проведено аналіз сумарного пасажиропотоку за кожним напрямком (Додаток Ж, рис. Ж.3). Результати графічного аналізу було зведено до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Аналіз пасажиропотоків поїздами філії УЗШК за напрямками у 2022-2023 роках

Роки	Напрямки	Львівський	Харківський	Донецький	Придніпровський	Одеський
2023р.	Туди (від Києва)	933472	820954	590699	483021	395901
	Зворотно (до Києва)	552213	269671	310694	243921	195462
2022р.	Туди (від Києва)	628819	544387	123634	285059	40882
	Зворотно (до Києва)	248851	267922	66168	149716	17395
Відсоткова частка 2022 року до 2023	Туди (від Києва)	67,36%	66,31%	20,93%	59,02%	10,33%
	Зворотно (до Києва)	45,06%	99,35%	21,30%	61,38%	8,90%

Домінуючим напрямком, також як і при перевезенні пасажирів поїздами дальнього сполучення залишився Львівський. Крім цього, саме цим напрямком користуються усі міжнародні дипломатичні делегації при відвідуванні з робочими візитами нашої країни. Відштовхуючись від цього, в подальшому дослідженні саме цей напрямок було взято за основний.

Аналіз рівня населеності швидкісних поїздів за основними напрямками показав суттєві коливання у динаміці показників у період 2021–2023 років (Додаток І). Зокрема, у 2022 році спостерігалось зниження середнього рівня населеності на всіх

напрямах порівняно з 2021 роком, що об'єктивно зумовлено впливом повномасштабної війни, евакуаційних процесів, а також тимчасовими змінами у транспортному попиті та пропозиції.

На Львівському напрямку рівень населеності знизився з 71% у 2021 році до 59% у 2022 році, однак вже у 2023 році відбулося відновлення показника до 83%, що перевищує навіть довоєнний рівень. Схожа динаміка спостерігалася і на інших напрямках: на Харківському напрямку населеність у 2022 році знизилася до 58% (проти 72% у 2021 році), а у 2023 році зросла до 75%. На Донецькому напрямку показник зменшився до 49% у 2022 році, тоді як у 2023 році відбулося часткове відновлення до 67%. На Придніпровському напрямку рівень населеності у 2022 році становив 52% проти 65% у 2021 році, а у 2023 році зріс до 77%. На Одеському напрямку зафіксовано аналогічні тенденції: 49% у 2022 році проти 59% у 2021 році, з наступним зростанням до 68% у 2023 році.

Отримані результати свідчать про високу адаптивність залізничного транспорту України, здатність до швидкого відновлення пасажирських потоків навіть в умовах триваючих загроз. Поступове зростання рівня населеності поїздів у 2023 році відображає стабілізацію ситуації з перевезеннями, відновлення довіри пасажирів до залізничного транспорту та ефективність заходів, спрямованих на організацію перевезень в умовах обмеженої пропускної спроможності мережі та підвищених безпекових ризиків [14].

Сумарна величина населеності поїздів філії УЗШК за 2022 рік, на Донецькому напрямку, базується на кількості перевезених пасажирів у проміжках січень-березень та жовтень-грудень, оскільки з квітня по вересень 2022 року, курсування поїздів категорії Intercity+ за даним напрямком було припинено.

Величина населеності поїздів філії УЗШК за 2022 рік, на Одеському напрямку базується на кількості перевезених пасажирів за січень-березень 2022 року, оскільки з квітня по січень 2023 року курсування на даному напрямку поїздів категорії Intercity+ також було припинено.

Швидкісні поїзди Інтерсіті+ мають значно менший час у дорозі ніж поїзди дальнього сполучення, що робить їх привабливішими для пасажирів, особливо для

ділових поїздок та подорожей на короткі і середні відстані. Також, поїзди даної категорії забезпечують вищий рівень комфорту, включаючи кондиціонування, інтернет, розетки для зарядки пристроїв, зручні сидіння та сучасний інтер'єр, що підвищує привабливість таких поїздів для широкого кола пасажирів, у тому числі пасажирів бізнес класу та туристів. Окрім цього, швидкісні поїзди, як правило, забезпечують вищий рівень точності розкладу і надійності перевезень, що є важливим фактором для пасажирів, які цінують пунктуальність та стабільність у своїх подорожах [10].

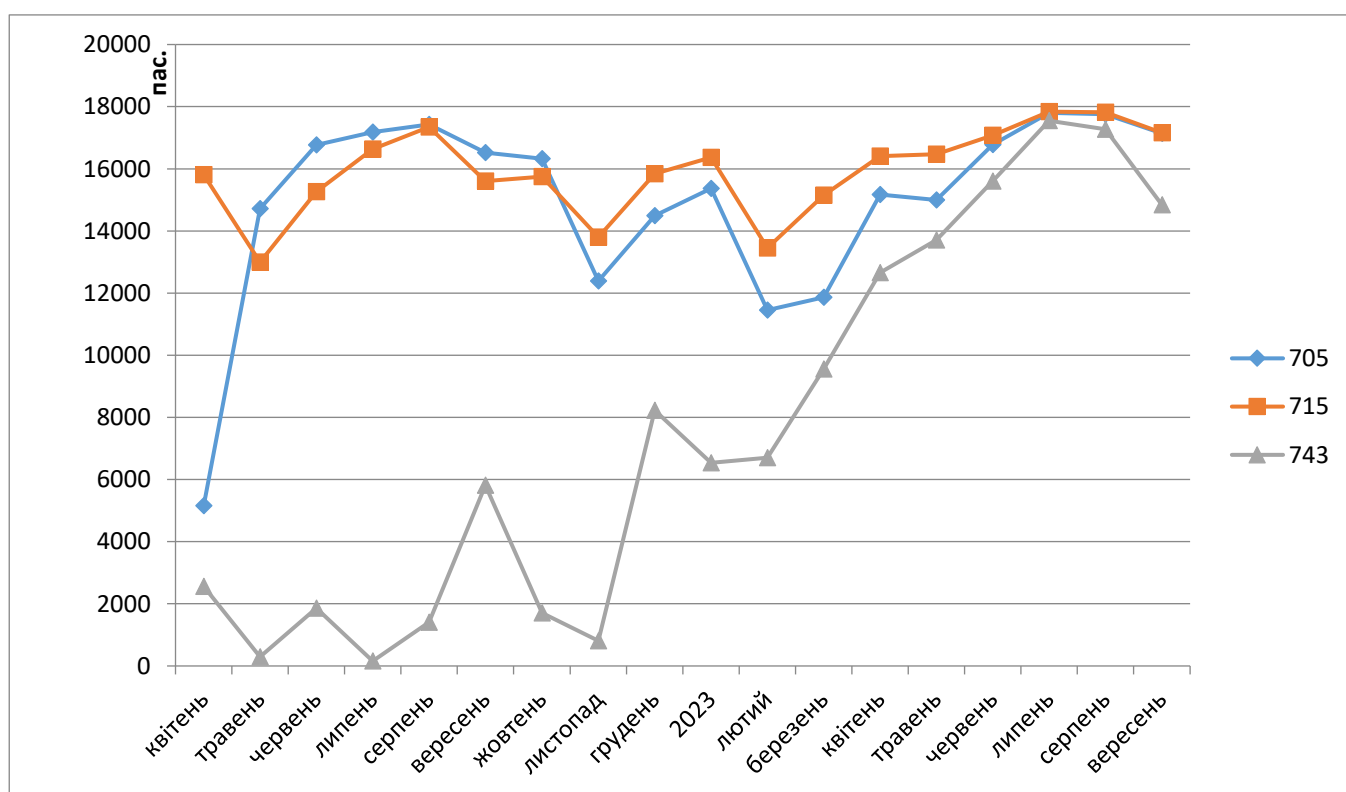


Рисунок 2.1 – Кількість перевезених пасажирів поїздами категорії Intercity+ у Львівському напрямку з квітня 2022 по вересень 2023 року

Тому, побудова моделі прогнозування пасажиропотоків буде проведено для одного з поїздів саме цієї категорії у львівському напрямку. Згідно з графічним аналізом кількості перевезених пасажирів поїздами категорії Intercity+ з квітня 2022 по вересень 2023 року (рисунок 2.1) найбільшим попитом серед пасажирів користується поїзд №715, сполученням Київ-Перемишль, тому саме на його прикладі

буде побудована модель прогнозування величини посадки та висадки пасажирів на графікових зупинках на основі апарату штучних нейронних мереж. Вхідні дані для навчання моделі прогнозування кількості пасажирів які здійснюють посадку та висадку, було взято на основі статистичних даних щодо посадки та висадки пасажирів по станції Вінниця, фрагмент яких наведено в додатку К

2.4 Побудова моделі прогнозування пасажиропотоку на графікових зупинках із застосуванням апарату штучних нейронних мереж

Як вже було аргументовано раніше, для прогнозування пасажиропотоків на залізничному транспорті найбільш доцільно використовувати метод нейронних мереж. Оскільки саме цей метод може вирішувати задачі при невідомих закономірностях, може адаптування до змін навколишнього середовища та має потенційну надвисоку швидкодію.

Нейронні мережі мають свою особливу властивість – здатність “навчатися” на основі даних, що описують об’єкти навколишнього середовища [38] нейронної мережі відбувається способом інтерактивного процесу корегування синоптичних ваг і порогів. Ідеальним випадком є, коли нейронна мережа навчається взаємозв'язкам, що містяться у навчальних даних на кожній ітерації процесу навчання [11].

Також, пасажиропотоки мають свою характерну особливість – вони є нерівномірними, тобто можуть змінюватися з часом [42]. На ступінь цих змін, як і на ступінь темпу міграційної активності, має вплив сукупність політичних, соціальних та економічних факторів, складовими яких є: сезонність перевезень, ефект вихідного дня, рівень середньої місячної заробітної плати в регіоні, грошовий дохід на душу населення в країні, рівень промислового виробництва в країні, доходи в певних галузях економіки, мінімальний споживацький бюджет, кількість населення країни, або певних її регіонів, доходна ставка від перевезень, рівень захворюваності в регіоні та наявність карантинних обмежень або бойових дій, тощо [16].

Проте, багато з цих показників дуже корельовані, тому додавання до моделі усіх можливих факторів не збільшить її якість [42,71]. Також, при короткостроковому

прогнозуванні не є раціональним використання факторів в яких неможливо відслідкувати щоденні зміни, такі як кількість населення або доходна ставка від перевезень. Виходячи з цього, при створенні моделі для подальшого прогнозування кількості пасажирів що провядять посадку та висадку на графікових зупинках, було обрано лише ті, які змінюються динамічно та мають найбільший вплив. Цими факторами, згідно з проведенням креляційним аналізом в публікаціях [42,71] є сезонність перевезень та ефект вихідного дня.

Фактор сезонності пасажирських перевезень повною мірою впливає на величину пасажиропотоку певних напрямів. Якщо подивитися на динаміку кількості перевезених пасажирів залізничним транспортом в Україні, за 2021-2023 роки (додаток Е), то можна побачити чітку закономірність, що в літній період, коли починається масовий сезон відпусток, та в період зимових новорічних свят, обсяги перевезених пасажирів стрімко збільшуються. Коефіцієнт нерівномірності (k_n) при цьому становить 1,24, що є підтвердженням високого рівня впливу даного фактору [12].

Яскравим прикладом використання сезонності пасажирських перевезень є призначення додаткових літніх та зимових поїздів керівництвом українського оператора залізниць АТ УЗ. Так, у 2023 році лише на період зимових свят було призначено 23 додаткових поїздів, а на період літніх перевезень було додано близько 30 додаткових поїздів, та скориговано розклад більше 10 наявних регулярних поїздів. Такі оптимізаційні заходи дали змогу уникнути перевантаження та нестачі рухомого складу, а також максимально задовільнити потреби пасажирів [11].

Ефект вихідного дня у пасажирських залізничних перевезеннях проявляється у зміні обсягу та структури пасажиропотоків у дні, що припадають на вихідні або святкові періоди. У такі дні зазвичай спостерігається підвищення попиту на перевезення. Також, ефект вихідного дня посилюється в періоди свят і вимагає гнучкого підходу до планування руху та оптимізації кількості вагонів [22]. Наглядний вплив ефекту вихідного дня на кількість пасажирів наведено на рис 2.2.

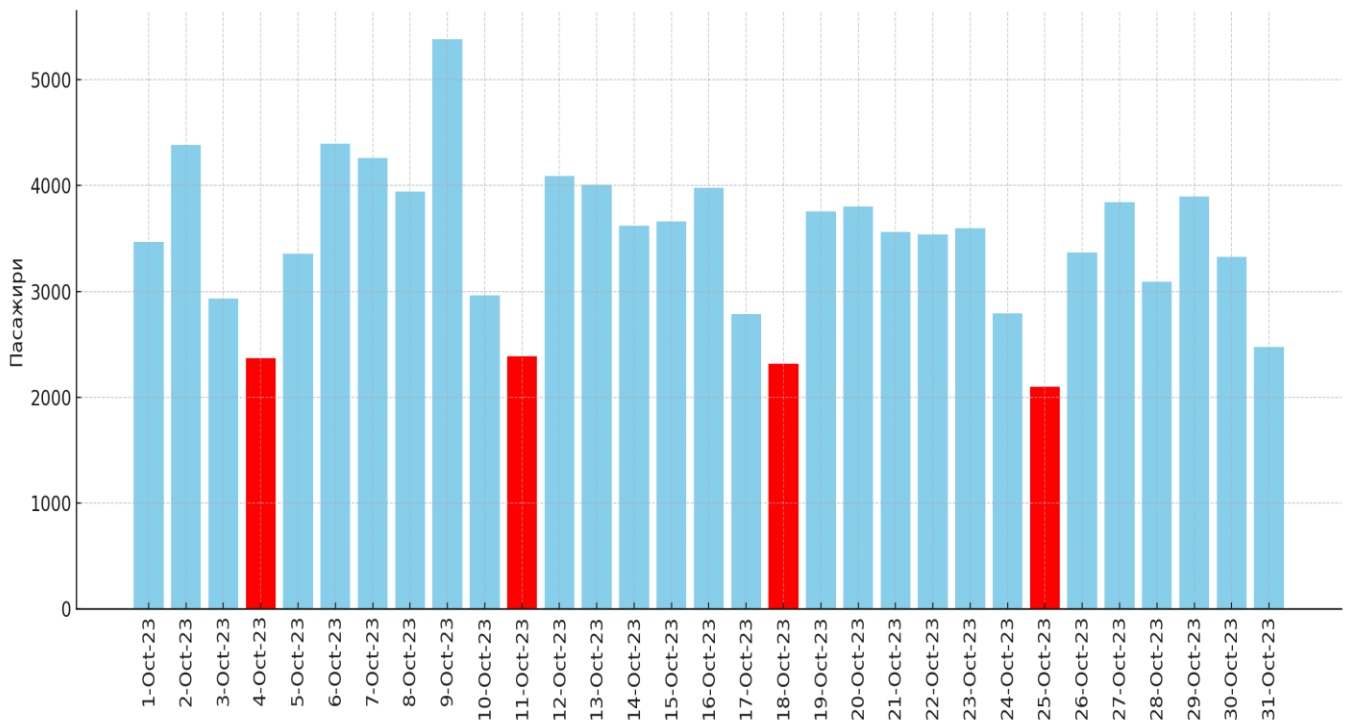


Рисунок 2.2 – Динаміка кількості перевезених пасажирів на ділянці Київ-Львів за жовтень 2023 року

Наведена динаміка наявно показала характерні коливання попиту протягом місяця, з помітним зниженням пасажиропотоку по вівторкам. Це свідчить про стабільний ефект середини тижня на населеність поїздів. Властивості цього ефекту такж використовуються оператором АТ УЗ при плануванні кількості вагонів у складі поїзда.

Побудова системи з використанням нейронних мереж починається з вибору її архітектури, а саме визначення кількості входів та виходів. Оскільки наша модель призначена для отримання прогностної кількості пасажирів, які сідають та виходять з поїзда на графіковій зупинці, то на вхід нейронної мережі подається значення показників попередніх семи періодів. В нашому випадку періодом є один день. Кожному дню (t) відповідає ряд даних, таких як день тижня (від 0 до 6), місяць (від 1 до 12), номер тижня року (від 1 до 52), індикатор святкового дня, кількість пасажирів, що сідають та виходять з поїзда на графіковій зупинці. На виході отримується два значення величини висадки та посадки пасажирів на графіковій зупинці показника на наступний день. Таким чином, на початку прогнозування, в

штучну нейронну мережу подається 42 входи, а масив цих вхідних даних X_n виглядає наступним чином:

$$X_n = \begin{bmatrix} x_1^{t-7} & x_2^{t-7} & x_3^{t-7} & x_4^{t-7} & x_5^{t-7} & x_6^{t-7} \\ x_1^{t-6} & x_2^{t-6} & x_3^{t-6} & x_4^{t-6} & x_5^{t-6} & x_6^{t-6} \\ x_1^{t-5} & x_2^{t-5} & x_3^{t-5} & x_4^{t-5} & x_5^{t-5} & x_6^{t-5} \\ x_1^{t-4} & x_2^{t-4} & x_3^{t-4} & x_4^{t-4} & x_5^{t-4} & x_6^{t-4} \\ x_1^{t-3} & x_2^{t-3} & x_3^{t-3} & x_4^{t-3} & x_5^{t-3} & x_6^{t-3} \\ x_1^{t-2} & x_2^{t-2} & x_3^{t-2} & x_4^{t-2} & x_5^{t-2} & x_6^{t-2} \\ x_1^{t-1} & x_2^{t-1} & x_3^{t-1} & x_4^{t-1} & x_5^{t-1} & x_6^{t-1} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

де x_1 — день тижня (від 0 до 6);

x_2 — місяць (від 1 до 12);

x_3 — номер тижня року (від 1 до 52);

x_4 — індикатор святкового дня (0 — звичайний день, 1 — свято);

x_5 — кількість пасажирів, що сідають у поїзд на графіковій зупинці;

x_6 — кількість пасажирів, що виходять з поїзда на графіковій зупинці.

Після чого, для подачі до нейронної мережі, масив даних X_n розгортається у вектор X :

$$X = [x_1^{t-7}, x_2^{t-7}, x_3^{t-7}, x_4^{t-7}, x_5^{t-7}, x_6^{t-7}, \dots, x_1^{t-1}, \dots, x_6^{t-1}]^T \in \mathbb{R}^{42} \quad (2.2)$$

де $\mathbb{R}$ - множина дійсних чисел.

Далі, усі вхідні проходять нормалізацію за мінімаксом до діапазону $[0;1]$ за формулою:

$$x_i^{normal} = \frac{x_i - x_i^{min}}{x_i^{max} - x_i^{min}}, \quad x_i^{normal} \in [0; 1], \quad i \in [1; 42] \quad (2.3)$$

Активация функції відбувається на всіх шарах за допомогою сигмоїдальної функції:

$$\sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (2.4)$$

де z - зважена сума на вході шару.

Обчислення проміжних (прихованих) шарів у нейронній мережі відбувається за загальним принципом лінійної трансформації + активації. Кількість прихованих шарів та кількість нейронів в кожному (2 шари по 8 нейронів), було визначено експериментально базуючись на отриманій величині похибки, яка вважається прийнятною в діапазоні від 0 до 10%. Архітектура нейронної мережі є повнозв'язною. Обчислення проміжних шарів та вихідних значень відбувалося за формулами наведеними нижче.

Обчислення першого проміжного шару:

$$\begin{aligned} z^{[1]} &= W^{[1]} * x^{normal} + b^{[1]} \\ a^{[1]} &= \sigma(z^{[1]}) \end{aligned} \quad (2.5)$$

де, $W^{[l]}$ — матриця ваг для шару l ;

$b^{[l]}$ — вектор зміщень;

$a^{[l]}$ — вихід шару після активації.

Обчислення другого проміжного шару:

$$\begin{aligned} z^{[2]} &= W^{[2]} * a^{[1]} + b^{[2]} \\ a^{[2]} &= \sigma(z^{[2]}) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Обчислення вихідного шару:

$$\begin{aligned} z^{[3]} &= W^{[3]} * a^{[2]} + b^{[3]} \\ \hat{y}^{normal} &= \begin{bmatrix} \hat{y}_1^{normal} \\ \hat{y}_2^{normal} \end{bmatrix} = \sigma(z^{[3]}) \end{aligned} \quad (2.7)$$

де, $\hat{y}_1^{normal}, \hat{y}_2^{normal}$ - нормалізована прогнозна кількість пасажирів, що сідають та виходять на графіковій зупинці на 8-й день.

Архітектура навчання нейронної мережі в загальному вигляді наведена на рис. 2.3:

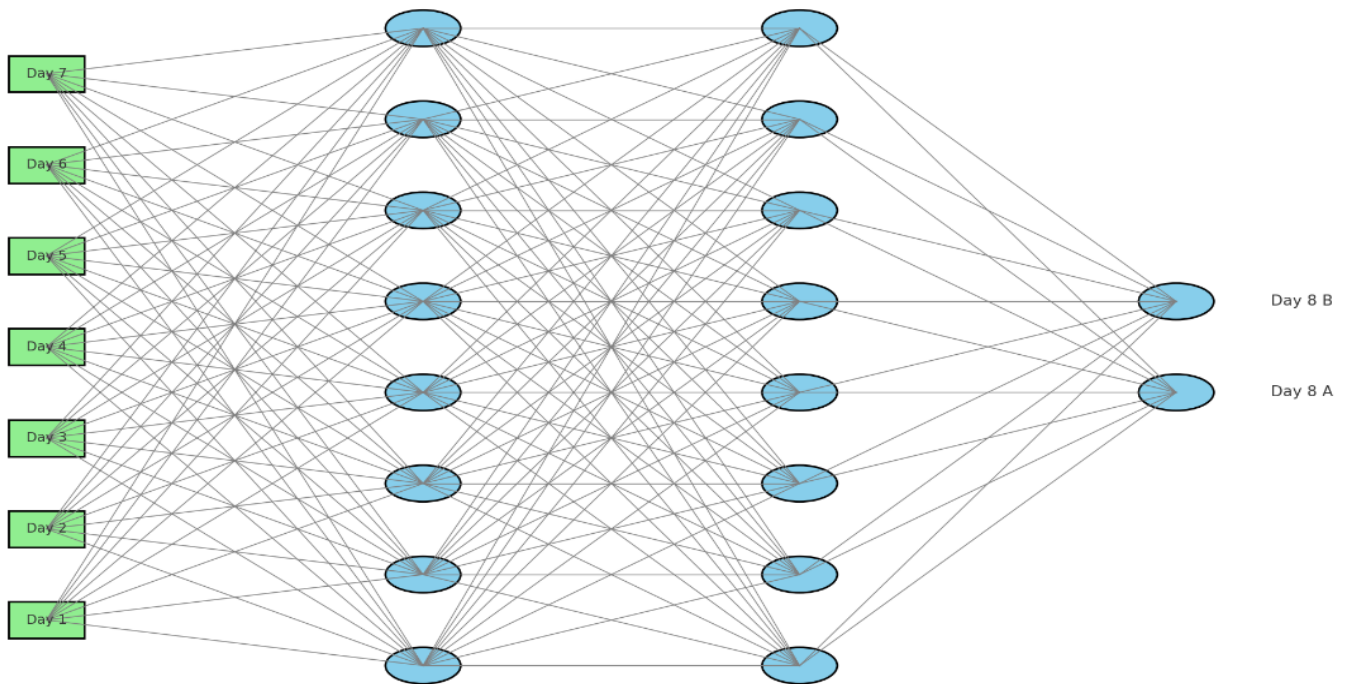


Рисунок 2.3- Архітектура навчання системи прогнозування пасажиропотоків на основі апарату нейронних мереж

Після отримання нормалізованої прогносної кількості пасажирів, що сідають та виходять на графіковій зупинці на 8-й день, відбувається денормалізація отриманих значень за формулами:

$$\hat{y}_1^{real} = \hat{y}_1^{normal} (y_1^{max} - y_1^{min}) + y_1^{min} \quad (2.8)$$

$$\hat{y}_2^{real} = \hat{y}_2^{normal} (y_2^{max} - y_2^{min}) + y_2^{min}$$

де $\hat{y}_1^{real}, \hat{y}_2^{real}$ - прогнозна кількість пасажирів, що сідають та виходять на графіковій зупинці на 8-й день.

Прогнозовані значення у системі порівнюється з реальним. Отримане реальне значення записується в базу даних і система проходить ще одну ітерацію навчання за методом ковзного вікна із сувом на один період. Схематично це наведено на рис 2.4:

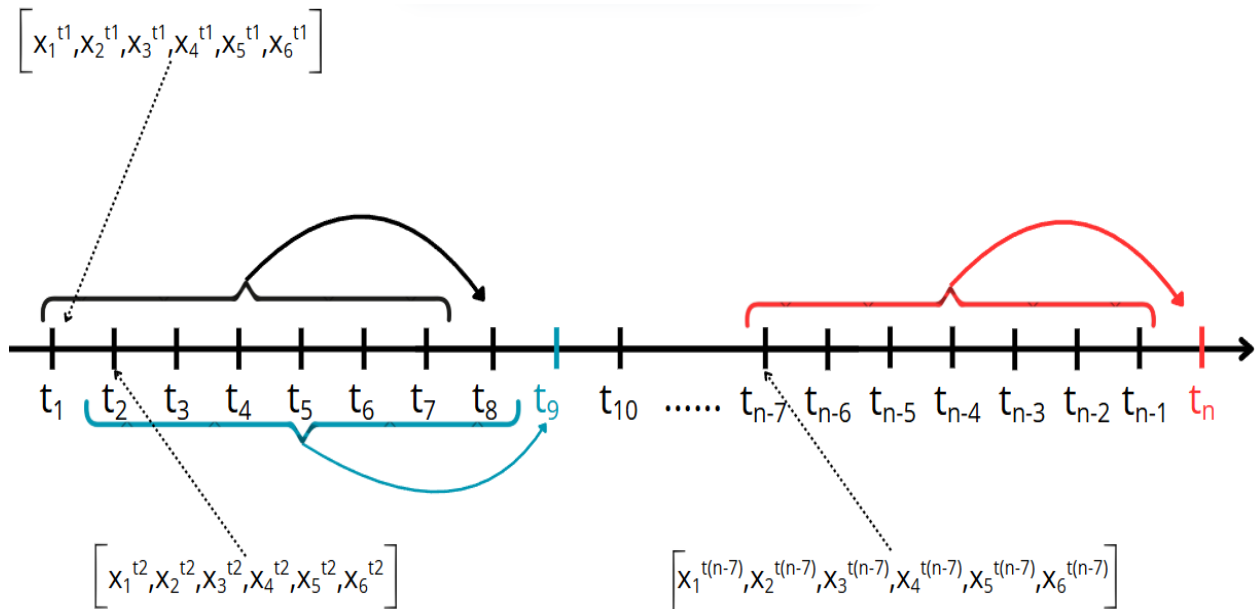


Рисунок 2.4 - Схема навчання нейронної мережі на часових рядах методом ковзаючого вікна

Оскільки, навколишнє середовище є нестационарним, то статистичні параметри вхідних сигналів, які генерує середовище, змінюються з часом. У таких випадках мережа не має змоги відстежувати варіації середовища, тому методи навчання з вчителем непридатні. Таким чином, варто постійно адаптувати параметри мережі до варіацій вхідних даних у режимі реальності, а процес навчання в адаптивній системі не завершується, допоки надходять нові дані для оброблення. Такий процес називають неперервним навчанням. Алгоритм його зображено на рис. 2.5.

Навчання моделі відбувається шляхом мінімізації середньоквадратичної помилки (Mean Squared Error, MSE):

$$\xi = \frac{1}{2} [(y_1^{real} - \hat{y}_1^{real})^2 + (y_2^{real} - \hat{y}_2^{real})^2] \quad (2.9)$$



Рисунок 2.5 – Загальний алгоритм навчання моделі прогнозування на основі апарату нейронних мереж [78]

Розв’язання задачі прогнозування було виконано за допомогою програмного комплексу MATLAB. Тип нейронної мережі був обраний Feedforward Neural Network (FFNN), що є одним із базових типів штучних нейронних мереж, у якому інформація передається від вхідного шару через один або кілька проміжних (прихованих) шарів до вихідного шару без зворотних зв’язків. Кожен нейрон у мережі виконує лінійне зважене підсумовування вхідних сигналів і передає результат через нелінійну функцію активації. FFNN ефективно застосовується для задач прогнозування, класифікації та апроксимації складних залежностей, особливо тоді, коли структура зв’язку між ознаками не є очевидною [1,8].

Навчання нейронної мережі було проведено засобом `trainlm` (Levenberg–Marquardt backpropagation), який є одним із найефективніших алгоритмів навчання для FFNN невеликої або середньої складності. Результати проведеного прогнозування було зведено до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати проведеного прогнозування щодо посадки висадки пасажирів по ст. Вінниця для поїзда № 715

Дата	День тижня (x_1)	Місяць (x_2)	Номер тижня (x_3)	Святкові дні (x_4)	Посадка (x_5)	Висадка (x_6)			
01.01.2023	6	1	52	1	168	183			
02.01.2023	0	1	1	0	161	83			
03.01.2023	1	1	1	0	53	115			
04.01.2023	2	1	1	0	104	47			
05.01.2023	3	1	1	0	170	179			
06.01.2023	4	1	1	0	104	44			
07.01.2023	5	1	1	1	69	194			
08.01.2023	6	1	1	0	161	167			
09.01.2023	0	1	2	0	125	180			
10.01.2023	1	1	2	0	65	49			
11.01.2023	2	1	2	0	137	184	Отримані результати		
...	...	...	...	...	...	...	Посадка	Висадка	Похибка
13.08.2024	1	8	33	0	22	169	21	168	2%
14.08.2024	2	8	33	0	176	146	172	145	2%
15.08.2024	3	8	33	0	33	161	35	158	2%
16.08.2024	4	8	33	0	96	155	100	150	3%
17.08.2024	5	8	33	0	102	147	102	146	0%
18.08.2024	6	8	33	0	172	86	178	84	3%
19.08.2024	0	8	34	0	157	193	159	190	1%
20.08.2024	1	8	34	0	98	176	91	188	6%
21.08.2024	2	8	34	0	196	133	199	130	2%
22.08.2024	3	8	34	0	57	138	61	135	2%
23.08.2024	4	8	34	0	161	113	160	112	2%
24.08.2024	5	8	34	1	177	31	178	30	0%

Як бачимо з отриманих результатів, що величина похибки становить не більше 6 %. Це свідчить про ефективність використання нейронних мереж у прогнозуванні величини посадки та висадки пасажирів на графікових зупинках пасажирського поїзда. Отримана модель дозволяє з високою достовірністю передбачати кількість пасажирів, які скористаються поїздом на вказаному маршруті. Застосування такої моделі дозволить забезпечувати більш точне та ефективне планування перевезень, що сприятиме оптимізації роботи залізничного транспорту. Динаміка середньоквадратичної похибки (MSE) нейронної мережі FFNN за епохами навчання наведено на рисунку 2.6.

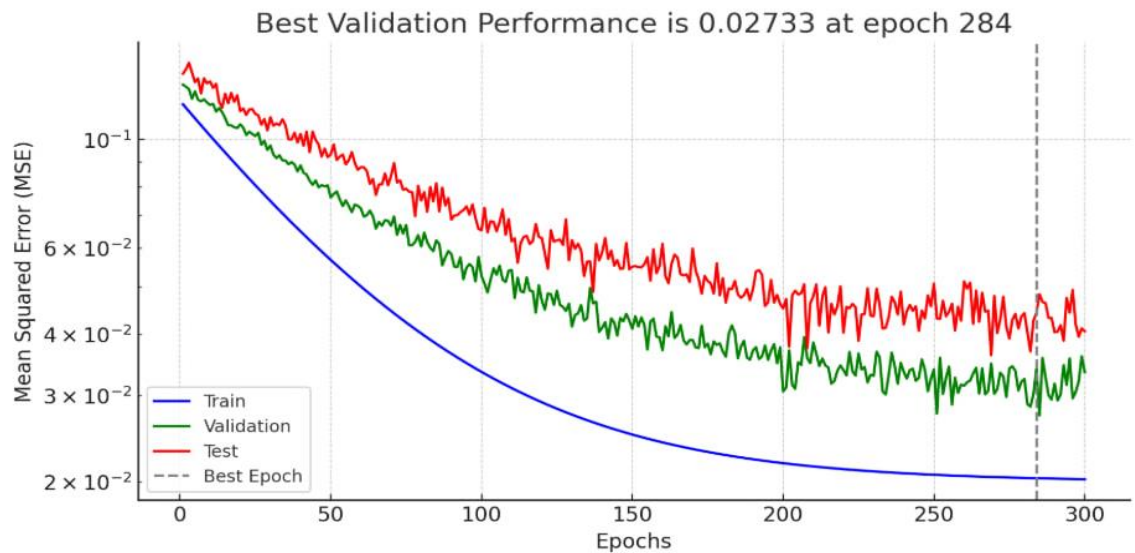


Рисунок 2.6 Динаміка середньоквадратичної похибки (MSE) нейронної мережі FFNN за епохами навчання

Для більш детальної апробації результатів прогнозування було взято результати прогнозування, за період з серпня по вересень 2023 року, вхідні дані для навчання нейронної мережі було взято з квітня 2022 року. Динаміку відхилень між прогнозованими та реальними значеннями величини пасажиропотоку для поїзда 715 було наведено на рис. 2.7:

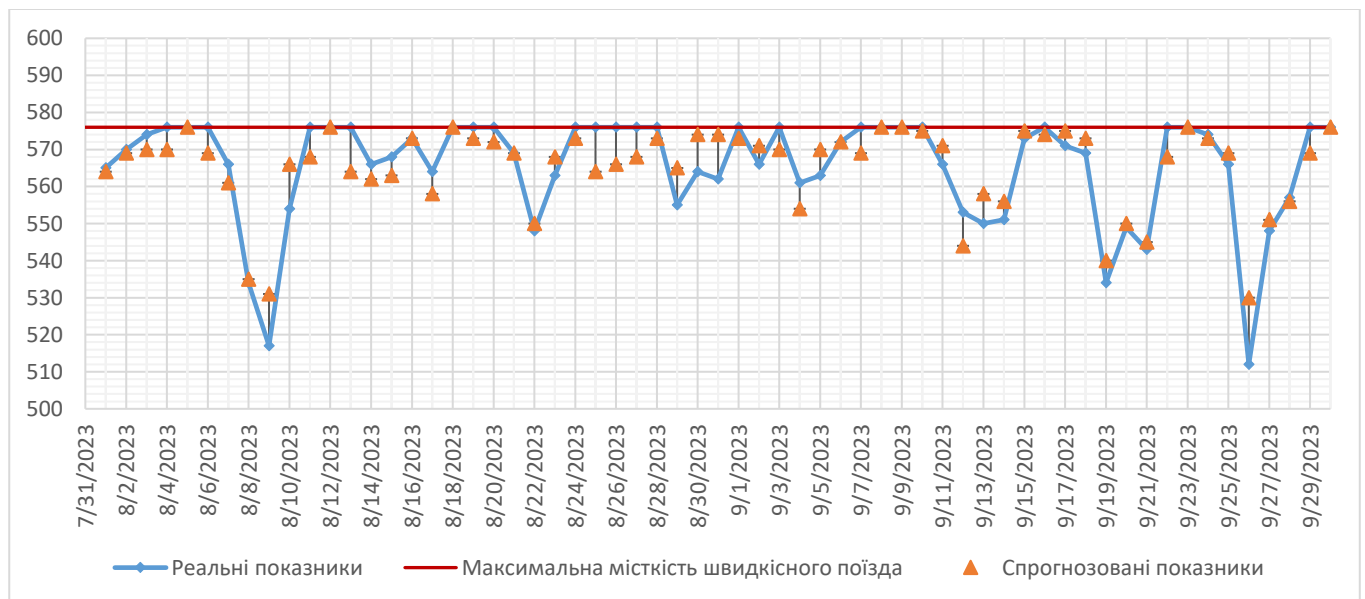


Рисунок 2.7 Динаміка відхилень між прогнозованими та реальними значеннями величини пасажиропотоку для поїзда 715 за серпень-вересень 2023 року.

У відсотковому еквіваленті, величину похибки прогнозування пасажиропотоків було наведено на рис. 2.8:

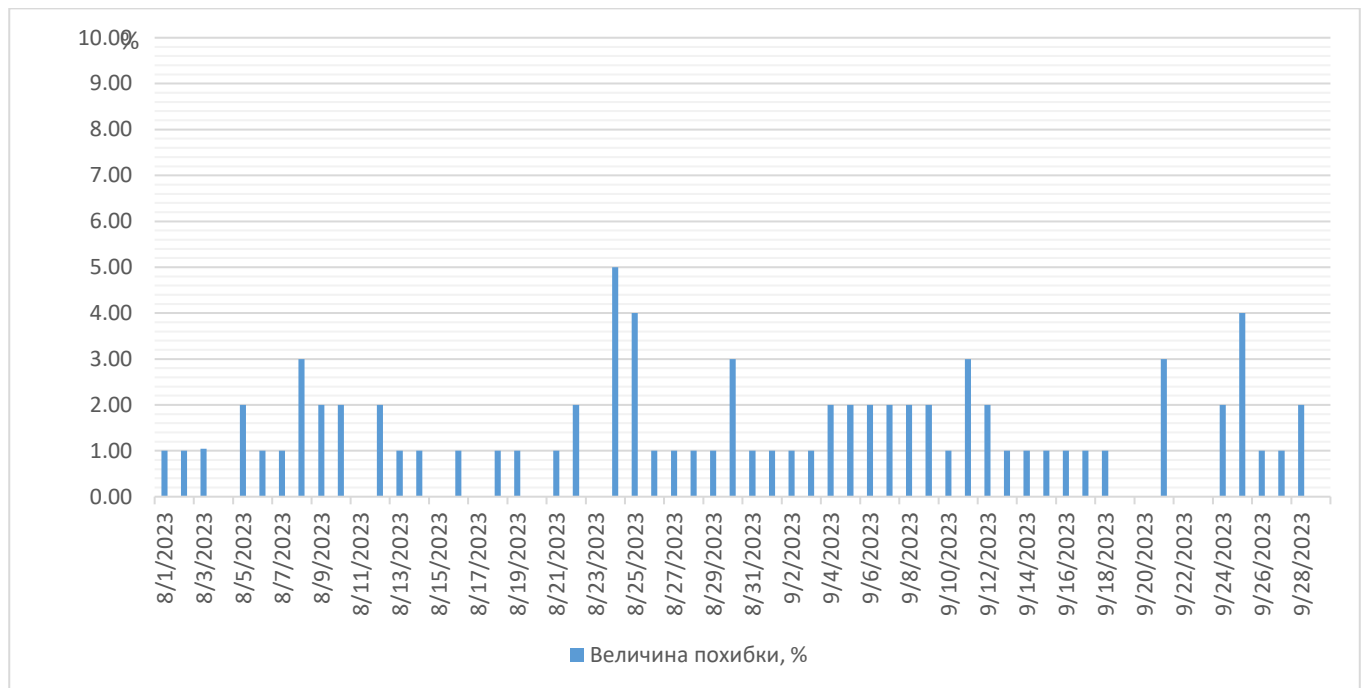


Рисунок 2.8 Величина похибки прогнозування у відсотковому еквіваленті

Для подальшої перевірки моделі на адекватність, було взято залишкову компоненту, та за допомогою програмного продукту EasyFit, було встановлено що залишкова компонента результатів моделювання розподілена за нормальним законом (рис. 2.9).

Математичне очікування, при цьому становить: 4,803, дисперсія: – 17,027, середнє квадратичне відхилення: 4,126; коефіцієнт варіації – 0,859. Функція щільності при цьому виглядає наступним чином:

$$f(x) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - 4,803}{4,126}\right)^2\right)}{4,126\sqrt{2\pi}} \quad (2.10)$$

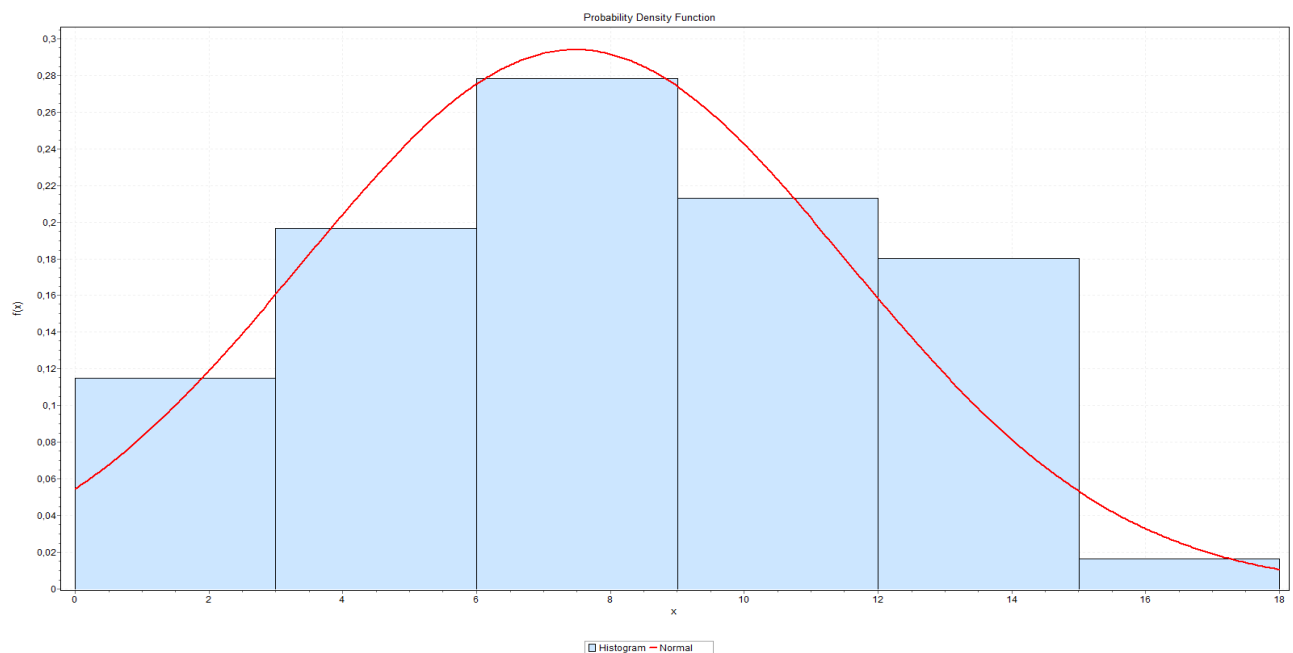


Рисунок 2.9 Нормальний закон розподілу залишкової компоненти

Для підтвердження адекватності розподілу залишкової компоненти здійснено оцінку за декількома критеріями згоди, такими як: критерій Пірсона (хі-квадрат), Колмогорова-Смірнова та Андерсона-Дарлінга. Результати було наведено на рис 2.10.

[#15] Normal

Kolmogorov-Smirnov					
Sample Size	61				
Statistic	0.111570281				
Rank	3				
α	0.2	0.15	0.1	0.05	0.01
Critical Value	0.1369994615	0.1459620431	0.1562049935	0.1741301567	0.2087001143
Reject?	No	No	No	No	No
Anderson-Darling					
Sample Size	61				
Statistic	1.248549762				
Rank	4				
α	0.2	0.15	0.1	0.05	0.01
Critical Value	1.374909123	1.602364241	1.928623595	2.501755964	3.907415935
Reject?	No	No	No	No	No
Chi-Squared					
Deg. of freedom	5				
Statistic	4.470943146				
Rank	6				
α	0.2	0.15	0.1	0.05	0.01
Critical Value	7.289276127	8.115199413	9.2363569	11.07049769	15.08627247
Reject?	No	No	No	No	No

Рисунок 2.10 - Перевірка за критеріями згоди

Наведені результати показують, що на підставі всіх трьох перевірок, гіпотеза про нормальний розподіл даних не відкидається на всіх зазначених рівнях значущості ($\alpha=0.2, 0.15, 0.1, 0.05, 0.01$). Це говорить про те, що дані, підкоряються нормальному закону розподілу.

2.5 Висновки до другого розділу

1. Оскільки транспорт є невід'ємною складовою життєдіяльності будь-якого суспільства, забезпечуючи зв'язок між населеними пунктами різних розмірів і сприяючи міграційній активності населення та зважаючи на динамічність політичних, соціальних та економічних змін, було визначено ступінь важливості прогнозування пасажиропотоків на графікових зупинках для раціонального планування та організації пасажирського руху. Актуальні умови ринкової економіки вимагають від пасажирських перевізників постійної адаптації, впровадження нових технологій і методів організації перевезень. Враховуючи складність та нелінійність кількості пасажирів які здійснюють посадку та висадку на графікових зупинках поїзда, особливо з урахуванням їх сезонних коливань було встановлено, що для їх прогнозування необхідно використовувати методики, що враховують нечіткість вхідної інформації та забезпечують швидку адаптацію до змін. Точне прогнозування пасажиропотоків на графікових зупинках поїзда дозволить покращити організацію пасажирських перевезень і уникнути перевантаженості транспортних систем.

2. Зважаючи на високу точність, здатність автоматично виявляти ознаки, ефективну роботу з великими обсягами даних, гнучкість і можливість тестування сценаріїв, найбільш підходящим методом для прогнозування пасажиропотоків у сучасному складному і динамічному середовищі було обрано метод нейронних мереж. Інші методи, хоч і можуть бути корисними в певних контекстах, але не можуть забезпечити такого рівня деталізації і адаптивності, як нейронні мережі.

3. Було встановлено, що загалом, пасажирські залізничні перевезення в Україні потребують диференційованого підходу до організації, враховуючи різноманітні географічні, економічні, соціальні та інфраструктурні особливості регіонів. Різні

умови гірських районів, віддаленість деяких регіонів, рівень економічної активності та нерівномірний розподіл населення створюють різні вимоги до перевезень. Великі міста та популярні туристичні напрямки вимагають більш інтенсивного та гнучкого підходу до розкладу поїздів.

Аналіз пасажиропотоків за 2022 рік показав, що найбільш затребуваним напрямком став Львівський, що пов'язано з евакуацією населення через бойові дії. Швидкісні поїзди Intercity+ залишаються найбільш привабливими для пасажирів завдяки меншому часу в дорозі, вищому рівню комфорту та надійності перевезень, що є особливо важливим для ділових подорожей і туристичних поїздок. Модель прогнозування пасажиропотоків для поїздів цієї категорії було побудовано на прикладі поїзда №715 сполученням Київ-Перемишль, який виявився найпопулярнішим серед пасажирів.

Таким чином, диференційований підхід до організації залізничних перевезень, що враховує місцеві умови та потреби пасажирів, є ключем до забезпечення ефективного та якісного обслуговування у сфері пасажирських залізничних перевезень в Україні.

4. У результаті проведеного дослідження було розроблено ефективну модель прогнозування кількості пасажирів, що здійснюють посадку та висадку на графікових зупинках пасажирських поїздів. Для розв'язання поставленого завдання обґрунтовано використання нейронної мережі типу Feedforward Neural Network (FFNN), навчання якої здійснювалося за допомогою алгоритму Levenberg–Marquardt (trainlm). Вхід до моделі формувався на основі впливових динамічних факторів, зокрема сезонності перевезень та ефекту вихідного дня, а також значень пасажиропотоку за попередні дні. В процесі моделювання було визначено оптимальну архітектуру мережі (2 приховані шари по 8 нейронів), що забезпечила високу точність прогнозування з похибкою не більше 6%.

Аналіз динаміки середньоквадратичної помилки, залишкових відхилень, а також перевірка залишкової компоненти за критеріями згоди підтвердили адекватність розробленої моделі. Результати моделювання засвідчили, що отримана прогнозна система є надійним інструментом для передбачення пасажиропотоку на

рівні окремих зупинок. Її застосування дозволяє підвищити точність планування перевезень, забезпечити раціональний розподіл рухомого складу та своєчасне реагування на зміни попиту в умовах нестабільного середовища.

РОЗДІЛ 3

ФОРМУВАННЯ МОДЕЛІ ОРГАНІЗАЦІЇ АЛЬТЕРНАТИВНИХ МАРШРУТІВ ПАСАЖИРСЬКИХ ПОЇЗДІВ

3.1 Визначення ризику затримки пасажирських поїздів внаслідок пошкодження залізничної інфраструктури.

Аналіз причин пошкодження залізничної інфраструктури проведений в розділі 1 показав, що основними з них є пошкодження внаслідок природних катаклізмів, транспортних подій та бойових дій. Кожне пошкодження залізничної інфраструктури, тягне за собою певну затримку вантажних або пасажирських поїздів. Відповідно до цього, виникає потреба в точному прогнозуванні потенційних затримок для забезпечення стабільної роботи залізничної мережі. Одним із засобів щодо отримання більш точних прогнозних значень затримок пасажирських поїздів внаслідок пошкодження залізничної інфраструктури є оцінка ризиків. Яка дозволяє своєчасно виявляти ділянки підвищеної небезпеки, коригувати планування перевезень та оперативно приймати управлінські рішення у разі надзвичайних подій.

Як відомо, ризиком називається сукупність можливості збитку та його тяжкості [33]. Можливість збитку оцінюється ймовірністю настання певної події. Тому, для зменшення потенційних збитків, а також для підвищення стійкості залізничної мережі до зовнішніх впливів, необхідно не лише оцінювати наслідки пошкоджень, а й точно прогнозувати ймовірність їх виникнення.

У цьому контексті особливої важливості набуває визначення ймовірностей виникнення пошкоджень залізничної інфраструктури під впливом основних причин. Зокрема, необхідно оцінити ймовірності руйнування внаслідок природних катаклізмів, транспортних подій та бойових дій для кожної окремої ділянки залізничної мережі. Такий підхід дозволяє здійснювати комплексну оцінку загального ризику затримки пасажирського поїзда та формувати обґрунтовані стратегії управління пасажирськими перевезеннями у надзвичайних умовах, а оскільки кожна

залізнична ділянка є унікальною, то визначення ризику затримки пасажирського поїзда відбувається окремо по кожній.

Першою причиною пошкодження залізничної інфраструктури, яка була розглянута в першому розділі є – природні катаклізми. До неї можна віднести зсуви ґрунту, викликані сильними дощами або землетрусами, повені, снігові замети, перепади температур та інше. Враховуючи, що кількість факторів достатньо велика, то визначення ймовірності пошкодження залізничної інфраструктури внаслідок погодних умов визначається за формулою:

$$P_{ij}^{\text{природ}} = 1 - \prod_{f=1}^F (1 - p_{ij}^f) \quad (3.1)$$

де $P_{ij}^{\text{природ}}$ – ймовірність пошкодження залізничної ділянки між станціями i та j внаслідок природних катаклізмів;

i, j – станції між якими знаходиться поточна ділянка;

p_{ij}^f – ймовірність пошкодження залізничної інфраструктури внаслідок одного з природних факторів f ;

$f \in F$ – множині всіх можливих природних факторів пошкодження залізничної інфраструктури.

В свою чергу p_{ij}^f обчислюється за формулою:

$$p_{ij}^f = \frac{N_{ij}^{\text{подій } f}}{N_{ij}^{\text{руйн } f}} \quad (3.2)$$

де $N_{ij}^{\text{подій } f}$ — кількість випадків прояву погодного фактора f на ділянці ij ;

$N_{ij}^{\text{руйн } f}$ — кількість руйнувань інфраструктури через фактор f на ділянці ij .

Наступною причиною, через яку відбувається пошкодження залізничної інфраструктури є - транспортні події, ймовірність виникнення яких напряду залежить від інтенсивності руху поїздів на дільниці. Тому, для розрахунку ймовірності пошкодження залізничної інфраструктури через цей фактор використовується наступна формула:

$$P_{ij}^{\text{трансп. події}} = \left(\frac{K_{ij}^{\text{поїздів}}}{N_{ij}^{\text{наявн}}} \right) \quad (3.3)$$

де $P_{ij}^{\text{трансп. події}}$ — ймовірність пошкодження залізничної дільниці між станціями i та j внаслідок транспортної події;

$K_{ij}^{\text{поїздів}}$ — середня кількість поїздів на дільниці між станціями i та j за добу;

$N_{ij}^{\text{наявн}}$ — наявна пропускна спроможність на дільниці між станціями i та j ;

Ймовірність пошкодження залізничної інфраструктури внаслідок бойових дій залежить, зокрема, від відстані до лінії фронту та концентрації штучних споруд на дільниці, які класифікуються як критичні об'єкти, вразливі до цілеспрямованого ураження або вторинного ураження внаслідок обстрілів.

Ймовірність пошкодження залізничної інфраструктури в залежності від наявності штучних споруд обчислюється як відношення кількості таких споруд на дільниці до максимальної кількості, зафіксованої серед усіх дільниць:

$$P_{ij}^{\text{уразливість шт. спор.}} = \left(\frac{K_{ij}^{\text{шт. спор.}}}{\max (K^{\text{шт. спор.}})} \right) \quad (3.4)$$

де $P_{ij}^{\text{уразливість шт. спор.}}$ — ймовірність пошкодження залізничної дільниці між станціями i та j внаслідок пошкодження штучних споруд;

$K_{ij}^{\text{шт. спор.}}$ — кількість штучних споруд на дільниці між станціями i та j .

Ймовірність пошкодження залізничної дільниці між станціями i та j внаслідок бойових дій визначається залежно від відстані до лінії фронту. При безпосередній близькості до фронту ($d < d_0$) ймовірність приймається максимальною і дорівнює 1, що відображає критичний рівень загрози.

У разі збільшення відстані від дільниці до лінії фронту ($d \geq d_0$) ймовірність пошкодження зменшується за експоненційною залежністю:

$$P_{ij}^{\text{лінії фронту}} = \begin{cases} 1, & d < d_0 \\ \lambda e^{-\lambda(d-d_0)}, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (3.5)$$

де $P_{ij}^{\text{лінії фронту}}$ - ймовірність пошкодження залізничної дільниці між станціями i та j в залежності від наближеності лінії фронту;

d – умовна відстань дільниці між станціями i та j до лінії фронту;

d_0 – відстань до лінії фронту за якої припиняється рух поїздів;

Використання експоненційної залежності обґрунтовано аналізом статистичних даних щодо розподілу випадків пошкодження залізничної інфраструктури залежно від відстані до активної лінії бойових дій. Статистичний аналіз проводився за допомогою програмного продукту Easy Fit та показав, що частота пошкоджень різко зменшується із зростанням відстані, причому характер зменшення наближений до експоненційного типу коефіцієнт щільності $\lambda \approx 0,02128$. Залежність кількості пошкоджень залізничної інфраструктури від відстані до лінії фронту наведено на рис. 3.1.

Візуальна відповідність емпіричної гістограми теоретичному розподілу підтверджена критеріями згоди Пірсона та Колмогорова–Смірнова, що дозволяє вважати обрану модель статистично обґрунтованою та придатною для подальшого знаходження ризиків затримки пасажирських поїздів в умовах пошкодження залізничної інфраструктури. Отримані результати можуть бути використані для динамічної оцінки рівня загрози на окремих дільницях залізничної мережі та адаптації маршрутів пасажирських поїздів відповідно до поточної ситуації в зоні бойових дій [3].

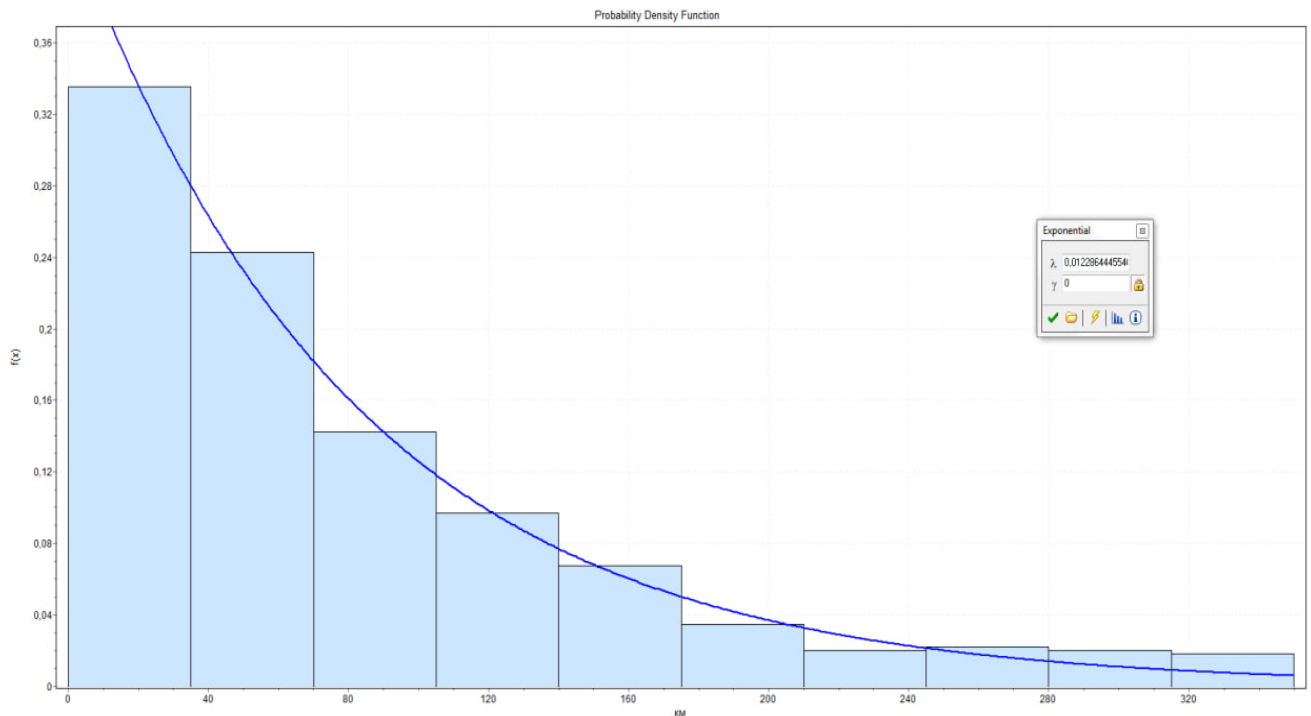


Рисунок 3.1 - Залежність кількості пошкоджень залізничної інфраструктури
наближеності до лінії фронту

Визначені індивідуальні ймовірності пошкодження для кожного фактора пошкодження інфраструктури створюють основу для подальшого розрахунку сумарної ймовірності пошкодження залізничної ділянки. Об'єднання окремих ймовірностей із урахуванням їх впливу дозволяє здійснити комплексну оцінку загальної небезпеки пошкодження інфраструктури на кожній конкретній ділянці мережі.

Для підвищення достовірності такої оцінки важливо не лише враховувати внесок кожного фактора, але й забезпечити адаптивність ваг, що характеризують їх значущість у змінних умовах функціонування залізничного транспорту.

Використання динамічного оновлення ваг у моделі оцінки ризику пошкодження залізничної інфраструктури обумовлено необхідністю забезпечення актуальності та адекватності оцінок у змінних умовах зовнішнього середовища [4]. Структура причин пошкоджень може змінюватися під впливом зовнішніх факторів, таких як активізація бойових дій у певному регіоні, зміна кліматичних умов або інтенсифікація транспортних навантажень. У зв'язку з цим статичні (постійні) ваги не здатні

адекватно відображати реальний розподіл ризиків у часі. Динамічне оновлення ваг на основі накопичених даних про фактичні пошкодження дозволяє автоматично враховувати актуальні зміни у структурі загроз, що підвищує точність прогнозування сумарної ймовірності пошкодження інфраструктури та забезпечує більшу ефективність у прийнятті управлінських рішень щодо пасажирських перевезень.

Нехай:

$w_k^{(t)}$ — вага фактора ризику k на момент часу t ,

$N_{\text{руйн},k}^{(t)}$ — накопичена кількість зафіксованих пошкоджень інфраструктури, спричинених фактором k , до моменту часу t ,

$\Delta N_{\text{руйн},k}$ — зміна кількості руйнувань для фактора k у період $t+1$.

Ваги в цьому випадку розраховуються за формулою:

$$w_k^{(t+1)} = \frac{N_{\text{руйн},k}^{(t)} + \Delta N_{\text{руйн},k}}{\sum_{k=1}^4 (N_{\text{руйн},k}^{(t)} + \Delta N_{\text{руйн},k})} \quad (3.6)$$

Оновлені ваги $w_k^{(t+1)}$ відображають актуальну частку кожного фактора у загальній структурі пошкоджень інфраструктури на момент часу $t+1$.

На основі цих ваг здійснюється розрахунок загальної ймовірності пошкодження залізничної дільниці ij , який враховує індивідуальні ймовірності руйнування, обумовлені впливом кожного з основних факторів.

З урахуванням оновлених ваг сумарна ймовірність пошкодження дільниці обчислюється за формулою:

$$P_{ij}^{(t+1)} = w_1^{(t+1)} P_{ij}^{\text{природ}} + w_2^{(t+1)} P_{ij}^{\text{трансп. под}} + w_3^{(t+1)} P_{ij}^{\text{лінії фронту}} + w_4^{(t+1)} P_{ij}^{\text{уразливість шт. спор}} \quad (3.7)$$

$$\sum w_k^{(t+1)} = 1, \quad k = 1, 2, 3, 4;$$

Таким чином, модель дозволяє не тільки оперативно враховувати нові дані про пошкодження, але й здійснювати адаптивну оцінку загального ризику пошкодження інфраструктури для кожної ділянки залізничної мережі.

Отримана сумарна ймовірність пошкодження залізничної ділянки $P_{ij}^{(t+1)}$ є ключовим показником для подальшого розрахунку ризику затримки пасажирських поїздів.

Оскільки кожне пошкодження інфраструктури потенційно спричиняє затримку руху поїздів, рівень ризику затримки визначається як добуток загальної ймовірності пошкодження на математичне очікування величини затримки пасажирських поїздів, що фіксувалася у статистичних даних для подібних випадків.

Таким чином, ризик затримки на ділянці ij розраховується за формулою:

$$R_{ij}^{(t+1)} = P_{ij}^{(t+1)} * M(T_{ij}) \quad (3.8)$$

Де $R_{ij}^{(t+1)}$ — очікуване значення ризику затримки на ділянці ij на момент часу $t+1$;

$P_{ij}^{(t+1)}$ — загальна ймовірність пошкодження інфраструктури на ділянці ij після оновлення ваг,

$M(T_{ij})$ — математичне очікування тривалості затримок пасажирських поїздів внаслідок пошкодження на ділянці ij , визначене за статистичними даними.

Оцінка ризику затримки вимагає визначення математичного очікування величини затримки пасажирських поїздів у разі пошкодження інфраструктури.

Статистичний аналіз наявних даних про затримки пасажирських поїздів показав, що розподіл тривалості затримок з високим ступенем достовірності підпорядковується нормальному закону розподілу.

Таким чином, математичне очікування затримки $M(T_{ij})$ визначається як середнє значення відповідного нормального розподілу, що апроксимує емпіричні дані.

Графічне підтвердження нормального розподілу затримок пасажирських поїздів внаслідок пошкодження залізничної інфраструктури наведено на рис. 3.2.

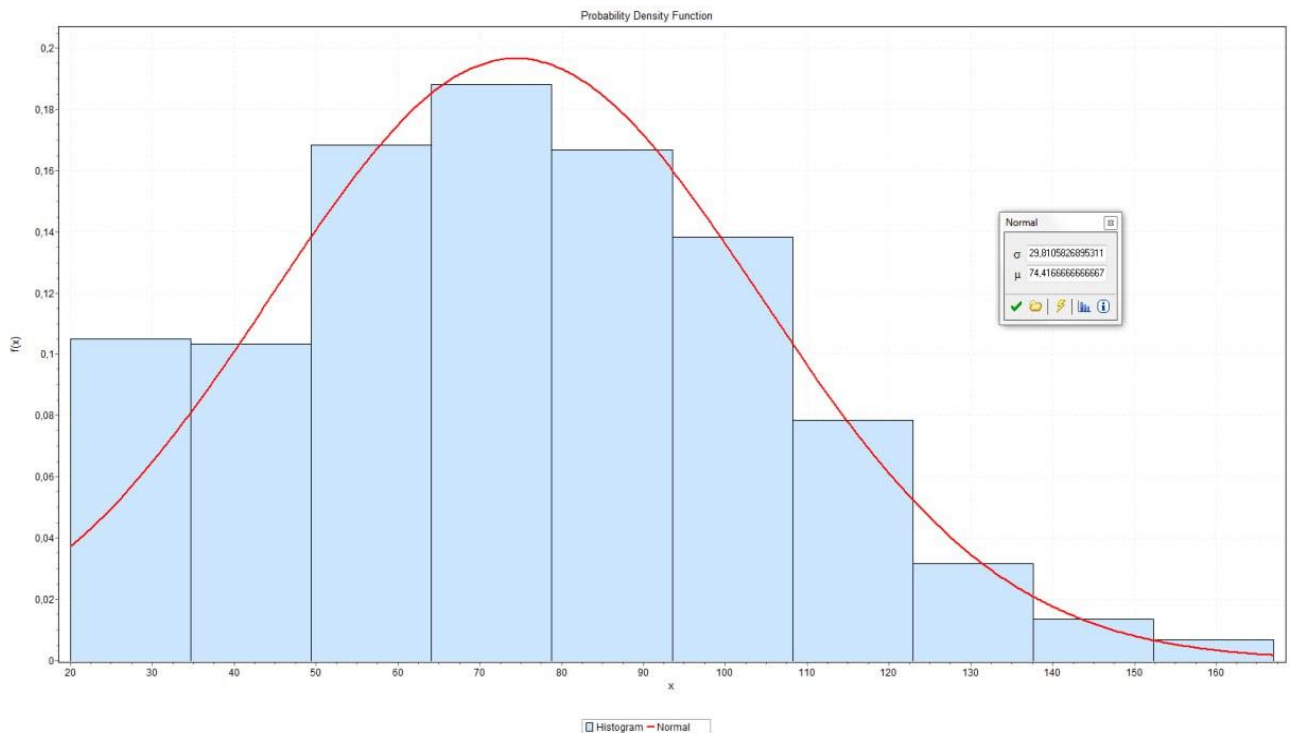


Рисунок 3.2 - Нормальний закон розподілу часу затримок пасажирських поїздів у випадках руйнування залізничної інфраструктури

Розрахований ризик затримки $R_{ij}^{(t+1)}$, що відображає очікувану величину затримки руху на ділянці внаслідок пошкодження інфраструктури, було безпосередньо враховано під час визначення загального часу прямування пасажирського поїзда.

З цією метою ризик затримки додається до нормативного часу проходження ділянки $T_{ij}^{\text{норм}}$, що визначений згідно з розкладом або технічними нормативами, з урахуванням особливостей маршруту, швидкості руху та типу тяги.

Таким чином, загальний очікуваний час $T_{ij}^{\text{заг}}$ проходження поїздом ділянки ij обчислюється за формулою:

$$T_{ij}^{\text{заг}} = T_{ij}^{\text{норм}} + R_{ij}^{(t+1)} \quad (3.8)$$

Таким чином, сформований метод оцінки ризику затримки пасажирських поїздів дозволяє комплексно враховувати імовірнісні характеристики виникнення пошкоджень під дією різних факторів ризику. Індивідуальні ймовірності пошкодження для кожного фактора динамічно об'єднуються в загальну ймовірність пошкодження дільниці із застосуванням ваг, які адаптуються відповідно до реальної структури зареєстрованих руйнувань.

На основі сумарної ймовірності та математичного очікування тривалості затримок, що моделюється за нормальним законом розподілу, розраховується ризик затримки для кожної дільниці. Відповідно, очікуваний ризик затримки інтегрується у розрахунок загального прогнозованого часу прямування поїзда, що дозволяє підвищити точність планування пасажирських перевезень та оперативно реагувати на зміни в технічному стані залізничної мережі.

3.2 Формування графу для обраного напрямку

Теорія графів є одним з найбільш ефективних інструментів для моделювання та аналізу транспортних мереж, включаючи залізничне сполучення. Вона дозволяє легко візуалізувати структуру залізничної мережі, де вузли представляють станції, а ребра — залізничні шляхи між ними. Це допомагає наочно уявити, як станції пов'язані між собою [114]. Також, графи дозволяють аналізувати найкоротші шляхи, визначати оптимальні маршрути, а також оцінювати час і відстань між станціями, що корисно для планування та оптимізації маршрутів. Застосовуючи алгоритми пошуку мінімальних шляхів або максимального потоку, можна ідентифікувати вузькі місця та критичні точки мережі, що потребують модернізації або розширення.

Теорія графів дозволяє легко модифікувати модель при додаванні нових станцій чи шляхів, що робить її дуже гнучкою та зручною для планування майбутніх змін. Використовуючи теорію графів, можна аналізувати надійність залізничної мережі, визначати альтернативні маршрути у випадку збоїв або ремонтних робіт [11].

Окрім цього, графи допомагають у визначенні пріоритетних напрямків для інвестування в інфраструктуру, на основі аналізу завантаженості різних ділянок мережі та прогнозів зростання пасажиропотоку.

У розділі 2, на основі аналізу кількості перевезених пасажирів, вже було обрано Львівський напрямок залізничних пасажирських перевезень за основний. Крім цього, саме цим напрямком користуються усі міжнародні дипломатичні делегації при відвідуванні з робочими візитами нашої країни.

Обраний напрямок, було зображено у вигляді зваженого графу $G(I, J)$ (рис. 3.3). Вершинами цього графу запропоновано взяти вузлові залізничні станції на заданому напрямку, а ребра представити у вигляді кортежу (час на подолання кожної ділянки з урахуванням ризику затримки пасажирського поїзда внаслідок пошкодження інфраструктури, наявність електрифікації, пропускна спроможність) [3,13]. Координати для побудови графу G наведено в додатку Л.

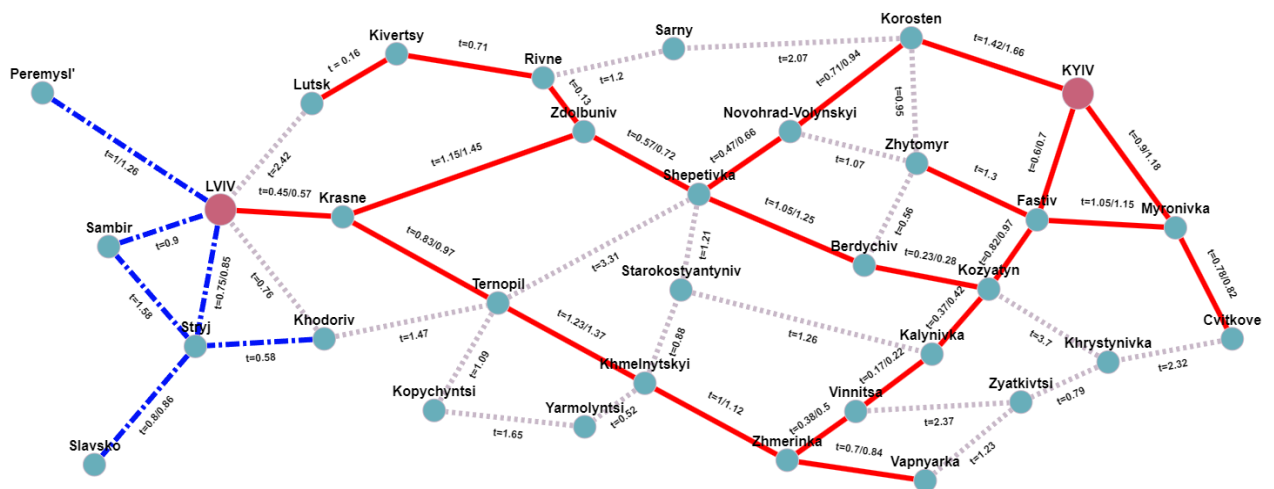


Рисунок 3.3 – Зважений граф дільниці Київ-Львів (суцільною лінією позначені ділянки електрифіковані змінним струмом, штрих-пунктиром – постійним, пунктиром – неелектрифіковані)

В реальних умовах, кожна ділянка (ребро графу) складається ще з певної кількості елементів (перегонів та проміжних станцій), кожен з яких мають власну максимально дозволену швидкість для руху пасажирських поїздів, затверджену начальником регіональної філії, в межах якої проходить маршрут прямування

пасажирського поїзду. Саме від величини цієї швидкості залежить час прямування поїзда, а відповідно й експлуатаційні витрати [3].

Тому, для того щоб процедура формування альтернативних маршрутів була більш точною, необхідно відштовхуватись не від відстані між вузловими станціями (як запропоновано в публікації [6]), а від часу потрібного для подолання цих відстаней та значення експлуатаційних витрат на одну поїздогодину для кожного виду тяги. Значення цього часу буде дорівнюватиме сумі відношень відстані кожного елементу дільниці на його максимальну швидкість.

У формальному вигляді опис графу $G(I, J)$ виглядає наступним чином, де, $I = I(i)$ – множина вершин графа (залізничні станції); $J = J(j)$ – множина ребр графа (залізничні дільниці) з вагою у вигляді кортежу.

$$J(i_k, i_{k+1}) = (t_{вл\ j}, t_{поїзд\ j}, t_{авт\ j}, h_j, N_j) \quad (3.9)$$

де, $t_{вл\ j}$ - час прослідування j -ї дільниці поїздом УЗШК власним ходом;

$t_{поїзд\ j}$ - час прослідуванні j -ї дільниці «поїздом-шаттлом»;

$t_{авт\ j}$ - час прослідування j -ї дільниці автобусом;

h_j - наявність електрофікації ($h=1$ - дільниця електрифікована, $h=0$ не електрифікована;

N_j – пропускна спроможність j -ї дільниці;

$k \in I(i)$ – номер вершини (станції).

Відповідно до положень теорії графів маршрут визначається як послідовність ребр, необов'язково різних, але таких, що кожні вершини двох сусідніх ребр співпадають. Граф, наведений на рисунку 3.1, є трьохзв'язним для швидкісних поїздів, при цьому кількість можливих маршрутів, що пов'язують вершину Київ і вершину Львів становить більше ніж 80. Відповідно до графа побудовано зважену матрицю суміжності (Додаток М, рисунок М.1), яка повністю та однозначно відтворює цей граф. Фрагмент цієї матриці наведено на рисунку 3.4. Вагу j -го ребра відображує необхідний час прослідування цієї дільниці t_j . Також, задля скорочення часу прямування поїздом альтернативним маршрутом та експлуатаційних витрат, у

роботі було враховане можливе використання спеціальних «поїздів-шаттлів», які б забезпечили підвоз пасажирів зі станцій, на яких заплановано їх посадку або висадку, до станцій через які проходить найбільш вигідний альтернативний маршрут.

Оскільки «поїзди-шаттли» будуть сформовані не швидкісними поїздами, а на локомотивній тязі, або за допомогою рейкових автобусів, то згідно з конструктивними особливостями залучених додаткових локомотивів та вагонів, їх максимальна швидкість не може перевищувати 100 км/год. Така величина швидкості буде прийнята на елементах діляниць з максимально дозволеною швидкістю більше 100 км/год. Час прямування «поїздами-шаттлами» по таким діляницям занесено через дріб до складеної матриці суміжності, фрагмент якої зображено на рисунку 3.4. В інших випадках цей час буде збігатися з часом прямування швидкісних поїздів.

	Київ	Коростень	Миронівка	Фастів	Козятин	Житомир	...	Самбір	Луцьк	Львів
Київ	X	1,42/ 1,66	0,9/ 1,18	0,6/ 0,7			...			
Коростень	1,42/ 1,66	X				0,95	...			
Миронівка	0,9/ 1,18		X	1,05/ 1,15			...			
Фастів	0,6/ 0,7		1,05/ 1,15	X	0,82/ 0,97	1,3	...			
Козятин				0,87/ 0,97	X		...			
Житомир		0,95		1,3		X	...			
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Самбір							...	X		0,9
Луцьк							...		X	2,42
Львів							...	0,9	2,42	X

Рисунок 3.4 – Фрагмент матриці суміжності по часу для залізничного транспорту (через дріб позначено час для «поїздів-шаттлів» на діляницях з максимальною швидкістю більше 100 км/год)

Окрім цього, для деяких випадків, наприклад при руйнуванні безпосередньо проміжної станції, яке унеможливило використання усіх залізничних діляниць, що підходять до неї, автором було враховано використання автомобільного транспорту

(автобусів) для підвозу пасажирів. Швидкість для таких автобусів була встановлена 90 км/год. Матриця суміжності для автобусів за часом наведено в додатку М, рисунок М.2, а фрагмент цієї матриці наведено на рисунку 3.5

	КИЇВ	Коростень	Миронівка	Фастів	Козятин	Житомир	...	Самбір	Луцьк	ЛЬВІВ
КИЇВ	X	1,73	1,20	0,70			...			
Коростень	1,73	X				0,92	...			
Миронівка	1,20		X	1,12			...			
Фастів	0,70		1,12	X	1,05	1,12	...			
Козятин				1,05	X		...			
Житомир		0,92		1,12		X	...			
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Самбір							...	X		0,85
Луцьк							...		X	1,63
ЛЬВІВ							...	0,85	1,63	X

Рисунок 3.5 – Фрагмент матриці суміжності по часу для автобусу при умовній швидкості 90 км/год

Таким чином, формування альтернативного маршруту при виникненні відмови у системі може бути за трьома варіантами:

1й варіант. Зміна основного маршруту прямування пасажирського поїзда із заїздом на кожну станцію, де необхідно провести посадку-висадку пасажирів.

2й варіант. Зміна основного маршруту прямування пасажирського поїзда без заїзду цим поїздом на станції, де необхідно провести посадку/висадку пасажирів. Організація доставки пасажирів на/з цієї станції буде організована спеціальними «поїздами-шаттлами».

3й варіант. Зміна основного маршруту прямування пасажирського поїзда без заїзду цим поїздом на станції, де необхідно провести посадку/висадку пасажирів. Організація доставки пасажирів на/з цієї станції буде організована за допомогою залучення автомобільного транспорту.

Також для отримання найбільш економічно вигідного рішення, можливим є варіант комбінування цих 3х варіантів.

3.3 Формування цільової функції та системи обмежень

Цільова функція відіграє критично важливу роль при створенні та розв'язанні багатьох видів задач, а саме вона формулює основну мету, яку необхідно досягти. Без чітко визначеної цільової функції не можна коректно сформулювати задачу і визначити, які рішення є оптимальними. Також, вона дозволяє перетворити реальну проблему на математичну модель, що полегшує її аналіз та подальше розв'язання.

За допомогою цільової функції можна враховувати різні обмеження і параметри задачі, що забезпечує гнучкість у моделюванні різних сценаріїв та умов. Наприклад, можна включати обмеження на обсяги перевезень, враховувати різні тарифи та умови доставки. Також, вона служить критерієм ефективності для порівняння різних можливих рішень та дозволяє оцінити, наскільки одне рішення краще іншого з точки зору обраного критерію, наприклад, витрат або прибутку.

Формування альтернативних маршрутів для пасажирських поїздів у разі пошкодження залізничної інфраструктури містить чітко задану мережну структуру, що складається з вершин та ребр (в нашому випадку задано графом зображеним на рисунку 3.3), а основною метою цієї задачі є знаходження оптимального шляху або кілька шляхів між заданими пунктами мережі. Також, поставлена задача має різноманітні обмеження (величина пропускної спроможності кожної ділянки, максимально допустима швидкість руху, тощо), а кількість можливих рішень може залежати від певних динамічних змін в часі. Усі ці ознаки вказують на те, що задача формування альтернативних маршрутів для пасажирських поїздів у разі пошкодження залізничної інфраструктури - є задачею маршрутизації.

Результати розв'язання задачі маршрутизації з використанням цільової функції надають конкретні дані для прийняття управлінських рішень. Це допомагає менеджерам та планувальникам ухвалювати обґрунтовані рішення щодо маршрутизації, розподілу ресурсів та управління логістикою.

Формування альтернативних маршрутів для пасажирських поїздів у разі пошкодження залізничної інфраструктури є надзвичайно важливою задачею маршрутизації з кількох критичних причин. По-перше, при руйнуванні залізничної інфраструктури, наприклад, через природні катастрофи, техногенні аварії чи військові дії, первинні маршрути можуть стати непридатними для експлуатації. Альтернативні маршрути дозволяють забезпечити безперервність перевезень пасажирів, уникнути їх затримок і дезорганізації. По-друге, пошкодження інфраструктури може призвести до значних економічних втрат як для залізничних компаній, так і для економіки в цілому. Правильно побудовані альтернативні маршрути дозволяють зменшити ці втрати, забезпечуючи продовження перевезень, що, своєю чергою, підтримує економічну активність та стабільність. По-третє, пошкодження залізничної інфраструктури може мати серйозні соціальні наслідки, зокрема, переривання важливих перевезень (наприклад, евакуація населення, перевезення гуманітарної допомоги). Також, оскільки безпека пасажирів є пріоритетом у транспортних перевезеннях, а надійність та стабільність транспортної системи ще впливають на довіру пасажирів, то забезпечення безперервного руху поїздів навіть у разі руйнування інфраструктури сприяє збереженню довіри пасажирів до залізничного транспорту як до надійного засобу пересування. Альтернативні маршрути допомагають мінімізувати такі наслідки, забезпечуючи продовження важливих перевезень, а також можуть забезпечити безпечний об'їзд небезпечних зон, зруйнованих ділянок та інших потенційно небезпечних місць, зменшуючи ризики для життя та здоров'я пасажирів.

Таким чином, формування альтернативних маршрутів для пасажирських поїздів у разі пошкодження залізничної інфраструктури є життєво важливою задачею маршрутизації, яка забезпечує безпеку, надійність, безперервність перевезень та мінімізацію економічних і соціальних втрат. Це критично важливий аспект планування, який сприяє стійкості та адаптивності транспортних систем до надзвичайних ситуацій та катастроф. Розробка альтернативних маршрутів дозволяє швидко реагувати на надзвичайні ситуації. Завдяки заздалегідь підготовленим варіантам маршрутів, перевізники можуть оперативно перенаправляти поїзди,

мінімізуючи час простою та забезпечуючи своєчасне прибуття пасажирів до місця призначення.

З метою визначення оптимального альтернативного маршруту сформовано оптимізаційну математичну модель за критерієм мінімального підвищення експлуатаційних витрат порівняно з експлуатаційними витратами на штатне графікове перевезення E . Дана математична модель враховує усі можливі варіанти формування альтернативного маршруту (продовження руху швидкісного поїзду власним ходом або з тепловозом, задіяння додаткових «поїздів-шаттлів» або автомобільного транспорту) [13]. Цільова функція при цьому має наступний вигляд:

$$E^T(x_{ij}^k, y_i^k) = E_{\text{експл.}}(x_{ij}^k) + E_{\text{орг.}}(y_i^k) + E_{\text{прост.}}(x_{ij}^k) \rightarrow \min \quad (3.10)$$

де: $E^T(x_{ij}^k, y_i^k)$ — сумарні додаткові витрати на альтернативний маршрут, грн.

T — кількість діб, на які потрібно зробити прогнозування;

$E_{\text{експл.}}(x_{ij}^k)$ — експлуатаційні витрати, грн;

$E_{\text{орг.}}(y_i^k)$ — організаційні витрати, грн;

$E_{\text{штраф.}}(x_{ij}^k)$ — витрати на простій підв'язаного поїзда.

Першу складову — експлуатаційні витрати — сформовано на основі витрат часу руху поїзда кожного типу по кожній ділянці, з урахуванням вартості поїздо-години. Її математичне подання має вигляд:

$$E_{\text{експл.}}(x_{ij}^k) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I \sum_{k=1}^3 x_{ij}^k t_{ij}^k C_{ij}^k \quad (3.11)$$

де, x_{ij}^k — бінарна змінна, що дорівнює 1, якщо транспорт типу k використовує ділянку між станціями i та j , інакше 0.

$k=1$ — швидкісний поїзд;

$k=2$ — поїзд на локомотивній тязі (поїзд-шаттл);

$k=3$ — автобус.

t_{ij}^k – час проходження дільниці між станціями i та j транспортом типу k (береться на основі розрахованих ризиків для дільниці ij в підрозділі 3.1), год;

C_{ij}^k – вартість однієї години роботи транспорту типу k , на дільниці між станціями i та j , грн;

При цьому:

$$C_{ij}^k = \begin{cases} h_{ij}C_{шв} + (1 - h_{ij})C_{тепл}, & k = 1 \\ h_{ij}C_{ел} + (1 - h_{ij})C_{тепл}, & k = 2 \\ C_{авт}, & k = 3 \end{cases} \quad (3.12)$$

де, $h_{ij} \in \{0;1\}$ – електрифікація ділянки, що задається графом G (1 — дільниця електрифікована, 0 — не електрифікована);

$C_{шв}$ — вартість поїздо-години швидкісного поїзда, грн;

$C_{ел}$ — вартість поїздо-години для «поїзда-шаттла» при прямуванні з електровозом, грн;

$C_{тепл}$ — вартість поїздо-години для «поїзда-шаттла» при прямуванні з тепловозом, грн;

$C_{авт}$ — вартість однієї години використання автобусу, грн;

Наступною складовою цільової функції є організаційні витрати, які виникають при необхідності формування альтернативних маршрутів із використанням різних видів транспорту в умовах пошкодження інфраструктури.

Організаційні витрати враховують специфіку забезпечення пасажирських перевезень за допомогою "поїздів-шатлів" (на електротязі або тепловозній тязі) або автобусного транспорту на окремих дільницях, а саме :вартість підготовки рухомого складу, технічний огляд і обслуговування після рейсу, вартість часу організації перевезень (підготовка документів, наказів, інструкцій на позаплановий рух) і тд.

У формальному вигляді це виглядає наступним чином:

$$E_{\text{орг}}(y_{ij}^k) = \sum_i^{L,D} \sum_{k=2}^3 y_{ij}^k C_{\text{орг}}^k \quad (3.13)$$

y_{ij}^k - бінарна змінна, формування транспорту типу k на станції i , дорівнює 1, якщо транспорт сформован, інакше 0;

L – Станції на яких можливе формування «поїздів-шаттлів»;

D – Станції на яких є в наявності автобуси;

$C_{\text{орг}}^k$ – організаційні витрати на залучення k -го виду транспорту, грн;

$$C_{\text{орг}}^k = \begin{cases} h_{ij} C_{\text{орг_ел}} + (1 - h_{ij}) C_{\text{орг_тепл}} + C_{\text{орг_ваг}} * N_k, & k = 2 \\ C_{\text{орг_авт}} * N_k, & k = 3 \end{cases} \quad (3.14)$$

де, $C_{\text{орг_ел}}$ - разові організаційні витрати на використання електровозу, грн;

$C_{\text{орг_тепл}}$ - разові організаційні витрати на використання тепловозу, грн;

$C_{\text{орг_авт}}$ - разові організаційні витрати на використання автобусу, грн;

$C_{\text{орг_ваг}}$ - разові організаційні витрати на використання одного пасажирського вагону, грн;

N_k - кількість рухомих одиниць, k -го виду транспорту;

$$N_k = \frac{\max(A_r, B_r)}{U_k} \quad (3.15)$$

A_r, B_r - величина посадки та висадки відповідно на станції i (отримується з моделі прогнозування сформованої в розділі 2 дисертаційної роботи), пас;

$r \in R$ - множині графікових зупинок заданого поїзда;

r - графікові зупинки заданого поїзда;

U_k - місткість однієї k -ї одиниці, пас.

Третьою частиною є витрати на організаційний простій поїзда через затримку пересадки пасажирів, які залежать від кількості підв'язаних поїздів під заданий. Формальний запис виглядає наступним чином:

$$E_{\text{прост}} = \sum_{r=1}^R z_r * C_{\text{пр}} * \max(0, T_{\text{факт}} - t_{\text{граф}}) \quad (3.16)$$

де, $z_r \in \{0;1\}$ – парасетр, який відображає наявність графікової підв'язки під інший поїзд на пром $z=1$ – на графіковій зупинці заданий поїзд підв'язаний під інший, $z=0$ – ні;

$C_{\text{пр}}$ – вартість однієї години простою пасажирського поїзду, грн;

$T_{\text{факт}}$ – час прямування альтернативним маршрутом, год;

$t_{\text{граф}}$ – час прямування графіковим маршрутом, год

$$T_{\text{факт}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I \sum_{k=1}^3 x_{ij}^k t_{ij}^k \quad (3.17)$$

$$t_{\text{граф}} = \sum_{i=1}^n t_{\text{вл } ij} \quad (3.18)$$

де n – кількість діляниць закладених в графіковому маршруті.

Для забезпечення коректності рішення задачі мінімізації додаткових витрат на побудову альтернативного маршруту пасажирського поїзда необхідно ввести систему обмежень, що відображає технічні, організаційні та логістичні умови функціонування залізничної мережі у випадку пошкодження інфраструктури.

Система обмежень моделі визначає допустимі правила побудови маршрутів та перевезень, а також гарантує реалістичність та практичну здійсненність запропонованих альтернатив. Основними групами обмежень є:

1. Виключення нульового переміщення (поїзд не може переміщатися із станції до самої себе):

$$x_{ij}^k = 0 \quad \forall i, j, k, i = j \quad (3.18)$$

2. Для кожної ділянки можна використовувати не більше одного типу транспорту:

$$\sum_{k=1}^3 x_{ij}^k \leq 1 \quad \forall (i, j) \in G \quad (3.19)$$

3. Обов'язковий вхід та вихід з кожної обов'язкової станції:

$$\sum_{(i,r) \in J} \sum_{k=1}^3 x_{ir}^k \geq 1, \quad \sum_{(r,j) \in J} \sum_{k=1}^3 x_{rj}^k \geq 1, \quad \forall r \in R \quad (3.20)$$

4. Обмеження на пропускну спроможність для пасажирських поїздів:

$$M_{ij} + x_{ij}^k \leq N_{\text{наявн } ij} \quad \forall (i, j) \in G, k = 1, 2 \quad (3.21)$$

де, M_{ij} - кількість поїздів, яка зараз знаходиться на ділянці ij

5. Обмеження, що кожен тип транспорту типу k , має повернутися на початкову станцію:

$$\sum_{j=1}^I x_{sj}^k - \sum_{i=1}^I x_{is}^k = 0, \quad \forall s \in (L, D), \forall k \in \{2, 3\} \quad (3.22)$$

6. Баланс пасажирів на кожній обов'язковій станції:

$$P_r x_{ij}^k = P_{r-1} + A_r - B_r, \quad P_r \geq 0 \quad \forall r \in R \quad (3.23)$$

7. Логічне обмеження на безперервність маршруту:

$$\sum_{(i,j) \in J} x_{ij}^k = \sum_{(j,m) \in J} x_{jm}^k \quad \forall j \in I, j \neq S_k, j \neq F_k \quad (3.24)$$

8. Формування поїздів шаттлів та автобусів відбувається лише у вершинах графу, в яких є така можливість L, D відповідно:

$$x_{ij}^k = 0 \quad \forall i \notin L, k = 2; \quad x_{ij}^k = 0 \quad \forall i \notin D, k = 3 \quad (3.25)$$

9. Максимально допустимий час на проходження альтернативного маршруту:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I \sum_{k=1}^3 x_{ij}^k t_{ij}^k \leq T_{max} \quad (3.26)$$

T_{max} – Час, який не може перевищувати прямування альтернативним маршрутом, год.

Таким чином, побудована математична модель пошуку альтернативного маршруту пасажирського поїзда в умовах пошкодження залізничної інфраструктури формалізується у вигляді задачі мінімізації сумарних додаткових витрат. Цільова функція моделі включає три основні складові: експлуатаційні витрати, організаційні витрати, а також витрати на простій пасажирських поїздів у разі затримок. Врахування кожного з цих компонентів дозволяє комплексно оцінити економічні наслідки відхилення від базового маршруту.

Допустимість та реалістичність побудованих маршрутів забезпечується системою обмежень, яка включає: виключення нульових переміщень, обмеження вибору транспорту на кожній ділянці, обов'язковий прохід через визначені станції, дотримання пропускної спроможності ділянок, баланс пасажирських потоків, забезпечення безперервності маршруту, правила формування альтернативного транспорту та обмеження максимального часу проходження маршруту.

Сукупність цільової функції та системи обмежень дозволяє сформувати економічно обґрунтований та технічно реалізований альтернативний маршрут руху пасажирського поїзда, адаптований до реальних умов експлуатації залізничної мережі в ситуаціях пошкодження інфраструктури.

3.4 Визначення найбільш оптимального методу моделювання для знаходження альтернативних маршрутів

Як вже було вказано, в підрозділі 3.3, формування альтернативних маршрутів для пасажирських поїздів у разі пошкодження залізничної інфраструктури є життєво важливою задачею маршрутизації, яка забезпечує безпеку, надійність, безперервність перевезень та мінімізацію економічних і витрат. Це критично важливий аспект планування, який сприяє стійкості та адаптивності транспортних систем до надзвичайних ситуацій та катастроф. Найголовнішим критерієм цієї задачі маршрутизації є мінімум додаткових витрат на кожний варіант альтернативного маршруту

Існує багато оптимізаційних методів для рішення тих або інших задач маршрутизації, основні з яких будуть розглянуті надалі. Найпростішим з них є метод з використанням алгоритму Дейкстри. Це класичний алгоритм для знаходження найкоротшого шляху в графі з невід'ємними вагами ребр. Основна ідея алгоритму Дейкстри полягає в поступовому оновленні відстаней від вихідної вершини до всіх інших вершин через поточну вершину з найменшою відстанню. Проте, такий алгоритм підходить лише для графів з невеликою кількістю вершин, тому для вирішення нашої задачі він не буде доцільним. [60].

Аналогічна ситуація і з алгоритмами Флойда-Уоршелла та Беллмана-Форда, які також не мають доцільності при вирішенні задач маршрутизації з великою кількістю вершин [5,83].

Наступним методом для вирішення задач маршрутизації є метод мурашиних колоній (Ant Colony Optimization). Метод мурашиних колоній є метаевристичним алгоритмом, натхненим поведінкою мурах в реальному середовищі у пошуках їжі.

Цей метод ефективно вирішує задачі маршрутизації і комбінаторної оптимізації. Основна ідея цього методу полягає в знаходженні мурахами найкоротшого шляху між колонією і джерелом їжі. Проходячи цей шлях мурахи залишають за собою феромонні сліди. Чим коротший шлях, тим більше феромонів на ньому залишається, що приваблює інших мурах. [52,56].

В алгоритмі роботи Ant Colony Optimization на початковому етапі проводиться встановлення початкових параметрів, таких як: кількість мурах, коефіцієнти випаровування феромонів, початкова кількість феромонів на ребрах, інтенсивність феромонів, а також визначення графу, де вершини представляють пункти маршруту, а ребра – можливі шляхи між ними.

Після чого, кожна мураха починає свій шлях з випадково обраної вершини. На кожному кроці мураха вибирає наступну вершину на основі ймовірності, яка залежить від інтенсивності феромонів на ребрах і евристичної інформації (наприклад, відстані до наступної вершини).

Після того як всі мурахи побудували свої маршрути, феромони на ребрах оновлюються. Феромони випаровуються з часом, що моделюється зменшенням інтенсивності феромонів на кожному ребрі. Феромони додаються на ребра, які входять до кращих знайдених маршрутів. Після кількох ітерацій мурахи зосереджуються на найкращих маршрутах, знаходячи наближені оптимальні рішення.

Перевагою методу мурашиних колоній є те, що їх алгоритми базуються на природніх процесах, що робить їх інтуїтивно зрозумілими та легко адаптованими до різних типів задач оптимізації. Також алгоритм мурашині алгоритми використовують колективну поведінку численних мурах, які досліджують простір рішень незалежно одна від одної, що дозволяє ефективно знаходити оптимальні рішення навіть у складних умовах.

До недоліків алгоритму мурашиних колоній можна віднести те, що хоча він і має певні механізми для уникнення застрягання в локальних оптимумах, вони все ж можуть виявитися недостатніми в деяких випадках, особливо при високій складності задачі. Окрім цього, випадковість в русі мурах може призводити до нестабільних

результатів, що потребує додаткових ітерацій для досягнення стабільного і прийняттого рішення.

Не менш популярним методом для пошуку оптимального рішення є метод генетичних алгоритмів (ГА), який застосовується у багатьох наукових галузях таких як машинне навчання, біоінформатика, рішення певних інженерних завдань, тощо [17]. Не є винятком використання ГА при вирішенні транспортних задач. Підтвердженням цьому є велика кількість наукових публікацій на задану тематику [115-117]. ГА є потужним інструментом для розв'язання різних задач. Вони імітують природний відбір, схрещення та мутацію для знаходження оптимальних або близько до оптимальних рішень складних задач, в тому числі і маршрутизації. Рішення задачі (індивіди) представляються у вигляді хромосом, які зазвичай кодуються як рядки бінарних чисел, але можуть використовуватися й інші представлення, наприклад, рядки з цілих або дійсних чисел. ГА починається зі створення початкової популяції рішень, яка зазвичай генерується випадковим чином. Для кожного індивіда в популяції обчислюється значення функції пристосування, яка оцінює якість рішення. Ця функція може бути, наприклад, значенням цільової функції оптимізаційної задачі. Відбір батьків для створення нових індивідів (нащадків) виконується на основі їх функції пристосування. Індивіди з вищою пристосованістю мають вищі шанси бути обраними. Використовуються різні методи відбору, такі як турнірний відбір, рулетка, пропорційний відбір, тощо.

Нові індивіди створюються шляхом схрещення пар батьків. Під час схрещення обмінюються частини хромосом батьків, що дозволяє комбінувати їх характеристики. Використовуються різні методи схрещення, наприклад, одноточковий, двоточковий або рівномірний. З метою збереження різноманітності популяції, окремі гени хромосом можуть зазнавати випадкових змін. Мутація запобігає передчасній збіжності алгоритму до локального оптимуму. Нові індивіди додаються до популяції, замінюючи старі індивіди або обираючи частину для заміни. Існують різні стратегії заміни, наприклад, заміна всіх батьків нащадками або лише часткове оновлення популяції. Алгоритм зупиняється, коли досягнуто заздалегідь визначеної кількості

поколінь, досягнуто бажаного рівня функції пристосування або відсутні значні покращення протягом певної кількості поколінь.

Перевагами ГА є те, що вони можуть застосовуватись до широкого спектру задач, включаючи задачі з багатьма локальними оптимумами, де традиційні методи можуть бути неефективними. Також, ГА достатньо ефективні для глобальної оптимізації і здатні знаходити оптимальні або близькі до оптимальних рішення у складних просторах пошуку. На відміну від деяких інших методів, ГА не потребують обчислення похідних функції пристосування, що робить їх придатними для задач з дискретними або складними цільовими функціями. Окрім цього, ГА можуть бути легко паралелізовані, оскільки операції над популяцією можуть виконуватись незалежно одна від одної, що значно може скоротити час обчислень.

Проте, ГА мають і власний ряд недоліків. По-перше, ГА можуть вимагати значного часу для обчислень, особливо для складних задач або великих популяцій. По-друге, ефективність генетичних алгоритмів сильно залежить від налаштувань параметрів, таких як розмір популяції, ймовірність схрещення і мутації, що потребує ретельної настройки [118].

Таким чином, враховуючи, що мурашині алгоритми можуть бути складнішими у реалізації та налаштуванні ніж ГА (оскільки вимагають додаткового моделювання поведінки мурашок та феромонових слідів), а також менший рівень природної паралелізації (оскільки мурахи взаємодіють через феромонові сліди, що потребує додаткової координації між процесами) та незважаючи на певні недоліки ГА, такі як необхідність налаштування параметрів і можливі значні часові витрати, для вирішення складних задач маршрутизації, до яких також відноситься формування альтернативних маршрутів для пасажирських поїздів, автором даної дисертації було прийнято рішення, щодо використання саме ГА для вирішення поставленої задачі маршрутизації.

3.5 Вирішення задачі мінімізації додаткових витрат за допомогою апарату генетичних алгоритмів

Альтернативні маршрути на залізничному транспорті є критично важливими для забезпечення безперервного функціонування пасажирських перевезень, особливо в умовах надзвичайних ситуацій. Необхідність у створенні таких маршрутів обумовлена різними факторами, які можуть вплинути на стан та доступність основних залізничних шляхів. Серед таких причин – руйнування залізничної інфраструктури внаслідок бойових дій, що стає особливо актуальним в теперішніх умовах. Крім того, погодні умови, такі як сильні зливи, снігові бурі чи інші природні катаклізми, можуть призвести до пошкоджень колій та інших об’єктів залізничної інфраструктури. Транспортні аварії також можуть стати причиною порушення нормального функціонування залізничного руху. Не менш важливим є проведення планових видів ремонту та обслуговування інфраструктури, що може вимагати тимчасового закриття певних ділянок [11].

У таких випадках альтернативні маршрути стають ключовим інструментом для забезпечення безпеки пасажирів та збереження високого рівня обслуговування. Вони дозволяють оперативно реагувати на непередбачені обставини, знижуючи ризики затримок і незручностей для пасажирів. Розробка і впровадження альтернативних маршрутів також сприяє підвищенню стійкості залізничної системи, забезпечуючи її надійність і гнучкість у будь-яких умовах.

З урахуванням особливостей задачі формування альтернативних маршрутів пасажирських поїздів, генетичні алгоритми є найбільш доцільним методом. Вони здатні знаходити оптимальні або близькі до оптимальних рішення навіть у складних і великих просторах, де традиційні методи можуть бути неефективними. Незважаючи на необхідність значних часових витрат та налаштування параметрів, їх здатність адаптуватися до різних умов і критеріїв робить їх найкращим варіантом для вирішення поставленої задачі. Загальний алгоритм роботи ГА наведений на рис. 3.6 [119]:



Рисунок 3.6 – Загальний алгоритм роботи ГА

У розділі 2 вже було проаналізовано та визначено найбільш популярний напрямок (Львівський) та поїзд серед пасажирів (715 Київ-Перемишль), тому подальше формування моделі організації альтернативних маршрутів, на основі апарату ГА, було проведено саме на їхньому прикладі. Загалом, граф сполучення Києва та Львова є багатозв'язним (рисунок 3.1) з кількістю можливих маршрутів що пов'язують ці 2 вершини більше ніж 80. Проте для поїздів філії УЗШК, враховуючи наявність електрифікації на цьому напрямку, існує 3 основних маршрути:

- 1) Київ- Коростень- Шепетівка –Здолбунів – Красне – Львів - Перемишль;
- 2) Київ – Козятин – Шепетівка – Здолбунів-Красне-Львів- Перемишль;
- 3) Київ-Козятин-Жмеринка-Хмельницький-Тернопіль-Красне-Львів-

Перемишль.

Прямування поїзда 715 проходить за третім варіантом, з проміжними графіковими зупинками на станціях Вінниця, Хмельницький та Тернопіль.

Як вже було сказано раніше, кожне ребро заданого графу формується у вигляді кортежу (3.1). Тому, на початковому етапі моделювання необхідно ввести вхідні дані щодо наявності електрифікації кожної ділянки h_j , величини її пропускної спроможності N_j та часу прямування для кожного виду тяги згідно з матрицями суміжності з додатка Л. Після чого, необхідно ввести вихідні дані, щодо вартості кожного етапу та виду перевезень ($C_{ел}$, $C_{тепл}$, $C_{авт}$, $C_{орг_ел}$, $C_{орг_тепл}$, $C_{орг_авт}$, $C_{орг_пк}$, $C_{пр}$). Наступним етапом вказати початковий маршрут прямування ($G_{поч}, \dots, G_{кін}$) з усіма графіковими зупинками $G_{пром}$, саме вони в подальшому будуть виступати контрольними точками, які мають бути задіяними обов'язково, та наявність підв'язки заданого поїзда до іншого. Після чого вказується поточне місцезнаходження заданого поїзду $G_{місц}$, та прораховується час прямування в графіковому режимі:

Далі, для того щоб обрати метод для вказування кількості пасажирів в поїзді перевіряється умова місцезнаходження поїзда. Якщо поїзд знаходиться ще на початковій станції, в нашому випадку на станції Київ, то величина посадки/висадки пасажирів на проміжних станціях береться згідно отриманих результатів прогнозування завдяки моделі на основі нейронних мереж, яка була сформована в розділі 2. Якщо поїзд знаходиться вже в дорозі, то величина висадки/посадки пасажирів вказується вручну на основі даних, щодо продажу квитків на цей рейс. Наприклад, для поїзда 715 існує підв'язка по станції Перемишль, на інші поїзди до Франкфурта-на-Майні та Гданська. У цьому випадку, до заданої моделі, підключається додаткова вартість простою цих поїздів в очікуванні заданого, яка обчислюється згідно формули 3.10. [120]

Таким чином, кожен індивід (маршрут) буде представлений послідовністю, де кожен елемент відповідає ділянці маршруту (ребру графа). Значення цього елементу на кожній ділянці може набувати одного з трьох значень: "Поїзд Intercity + (T_{ic+})", «Поїзд-шаттл (T_{sttl})» або «Автобус (T_{auto})». В свою чергу «поїзд-шаттл» може набувати 2х значень в залежності від задіяного виду тяги: «тепловозний» ($T_{sttl_теп}$) або «електровозний» ($T_{sttl_ел}$). В бінарному вигляді це виглядає наступним чином:

Київ		Фастів	
1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	1	0
0	0	0	1
T_ic+	T_sttl_tep	T_sttl_tep	T_auto

- Прямування поїзда 715 власною тягою
- Прямування із залученням тепловозу
- Прямування із залученням електровозу
- Прямування автобусом

Рисунок 3.7 – Кодування видів тяги в бінарному вигляді

Далі, необхідно сформулювати початкову популяцію, яка буде забезпечувати стартову точку для еволюційного процесу. Для заданого поїзда №715, при графіковому прямуванні в нормальному режимі, згідно з вихідним графом (рисунок 3.3), початкова популяція виглядає наступним чином:

Київ				Фастів				Козятин				Красне				Львів			
1	0	0	0	1	0	0	0	...	1	0	0	0	1	0	0	0			
T _{ic+}	T _{sttl el}	T _{sttl tep}	T _{auto}																

Рисунок 3.8 – Початкова популяція для поїзда №715 Київ-Перемишль

Оскільки прямування в такому випадку відбувається тільки власною тягою, без залучення «поїздів-шаттлів» чи автомобільного транспорту, то на кожній ділянці, активним залишається лише T_ic+.

Після введення усіх вихідних даних створюємо можливість видалення певного елементу графу (вершини чи ребра), в обхід якого, згідно з одержаної оперативної інформації щодо пошкодження залізничної інфраструктури, необхідно буде побудувати альтернативний маршрут. Варто зазначити, що якщо руйнування залізничної інфраструктури відбувається на станції, та унеможлиблюється приймання поїздів на неї, то першочергово перевіряється умова щодо наявності посадки/висадки пасажирів на цій станції. Якщо посадка/висадка є, то доставка пасажирів можлива

лише автомобільним транспортом. У цьому випадку, почергове обчислення можливих витрат для виключених ділянок ведеться лише за формулою 3.8.

Наступним кроком при формуванні альтернативного маршруту є використання оператора схрещування (або кросоверу), який є одним з основних елементів генетичного алгоритму, що відповідає за комбінацію генетичної інформації в батьківських індивідуумах для створення одного або кількох нових нащадків. Метою схрещування є передача корисних властивостей від батьків до нащадків та створення нових комбінацій генів, які можуть покращити якість рішень у наступних поколіннях.

Для вирішення нашої задачі, найбільше підходить впорядковане схрещування (англ., Order Crossover). При такому виді схрещування вибирається сегмент у однієї хромосоми, який зберігається в нащадку, а решта заповнюється в порядку появи елементів у другій хромосомі. Тобто, після вказівки ділянки на якій має перерватися рух поїздів, не є обов'язковим повна переробка початкового маршруту, а лише тієї частини, яка зруйнована або замінена на використання автомобільного транспорту. Схематично процес схрещення для поїзду №715 наведено на рис. 3.9. Варто також зазначити, що кожній ділянці може відповідати лише один вид пасажирських перевезень.

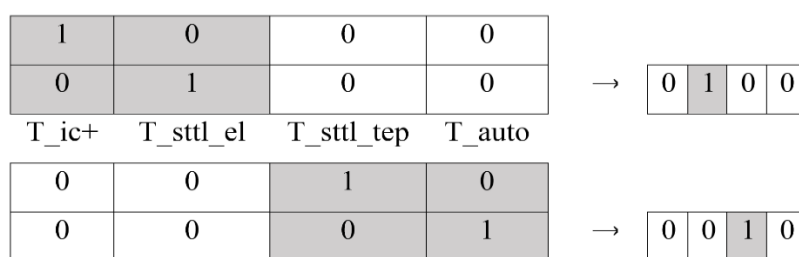


Рисунок 3.9 – Процес схрещення елементів ГА

Після проведення операції схрещення в кожній моделі на основі апарату ГА іде процес мутації, який вносить випадкові зміни в нащадків для підтримки генетичної різноманітності в популяції. Ці зміни можуть торкнутися однієї або декількох позицій у геномі. Мутація відбувається з певною ймовірністю, яка називається швидкістю

мутації. Зазвичай це невелике значення (наприклад, 0.01 або 1%), щоб не руйнувати занадто сильно генетичну структуру, але при цьому вводити різноманітність.

При формуванні моделі організації альтернативних маршрутів пасажирських поїздів, в процесі мутації, в залежності від початкового нормального маршруту прямування поїзду, кількості пошкоджених та задіяних ділянок для альтернативного перевезення, може додаватися або відніматися кількість елементів маршруту відносно початкового. Процес одного з варіантів мутації для поїзда №715 у випадку пошкодження інфраструктури на ділянці Хмельницький-Тернопіль наведено на рисунку 3.10.

Київ				Фастів	Хмельницький				Тернопіль				Красне				Львів	
1	0	0	0	...	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0		
T_ic+	T_sttl_el	T_sttl_tep	T_auto															

Київ				Фастів	Хмельницький				Яроменці				Копиченці				Тернопіль				Красне				Львів	
1	0	0	0	...	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0		
T_ic+	T_sttl_el	T_sttl_tep	T_auto																							

Рисунок 3.10 - Процес мутації елементів ГА для поїзду №715 при прямуванні через неелектрифіковані ділянки

Також, у разі зміни маршруту основного поїзда, без заїзду на ті станції де мала проводитися посадка-висадка пасажирів, обов'язковим є залучення «поїздів-шаттлів» або автобусів. В цьому випадку, до основного альтернативного маршруту, ще додаються додаткові для цих категорій перевезень. Формування генотипу в такому випадку проводиться наступним чином (рисунок 3.12). Заданий поїзд №715 змінює свій маршрут з варіанту 3 на варіант 2. А доставка пасажирів з Тернополя та Хмельницького виконується за допомогою 2х «поїздів-шаттлів». Аналогічний процес мутації відбувається і при залученні автомобільного транспорту.

У формальному вигляді, кожна зміна виду транспорту чи виду тяги при формуванні альтернативного маршруту, забезпечується за допомогою булевих змінних. А безпосередньо експлуатаційні витрати при різних варіантах та комбінацій альтернативних маршрутів обчислюються за формулами 3.4-3.11. Варто також зазначити, що по одному ребру графа, може проїхати лише один вид транспорту.

Наступною операцією при моделюванні за допомогою апарату ГА є операція відбору, яка визначає, які особини (розв'язки) з поточної популяції будуть використані для створення наступного покоління. Саме відбір впливає на швидкість, з якою генетичний алгоритм знаходить оптимальне розв'язання.

При формування моделі організації альтернативних маршрутів для пасажирських поїздів, відбір найкращих популяцій проводиться за допомогою функції пристосування 3.11. При цьому, при формуванні нових популяцій враховуються такі обмеження як максимальна швидкість руху (для поїздів категорії інтерсіті + не більше 160 км/год, «поїздів-шаттлів» не більше 100 км/год, автобусів не більше 90 км/год), максимальна місткість поїзду (не більше 576 пасажирів) та рівень пропускної спроможності, який не може перевищувати наявну.

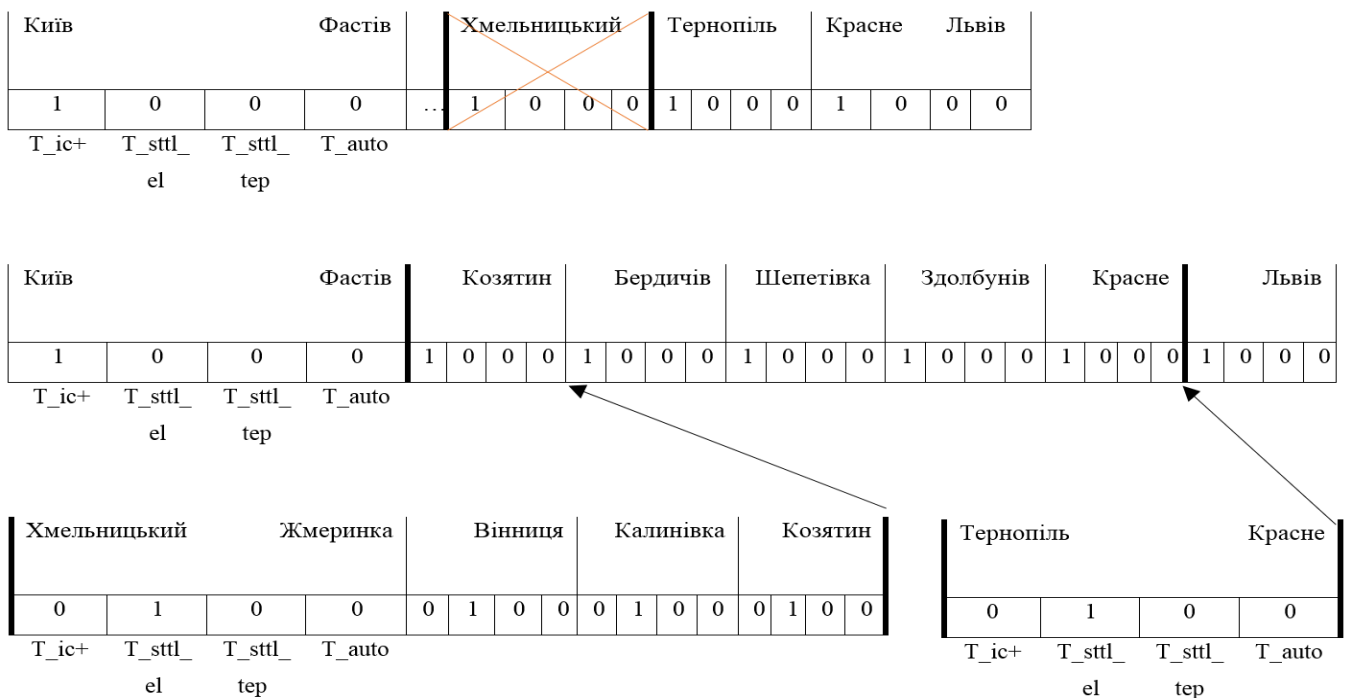


Рисунок 3.11 - Процес мутації елементів ГА у випадку залучення «поїздів-шаттлів»

Заданий генетичний алгоритм запропоновано виконувати на за допомогою програми MATLAB з використанням інструменту `ga()` з Global Optimization Toolbox.

Процес роботи комплексної системи надання альтернативних маршрутів для пасажирських поїздів філії УЗШК наведено на рисунках 3.12 – 3.15, на яких суцільними лініями зображено електрифіковані дільниці, а пунктирною лінією – неелектрифіковані. На рисунку 3.12 червоним кольором зображено маршрут прямування поїзда №715 сполученням Київ-Перемишль в нормальних умовах. Після чого, було штучно виведено дільницю з пошкодженою інфраструктуру (Хмельницький-Тернопіль), знаходження поїзда №715 при цьому становить по станції Хмельницький (рисунок 3.12).

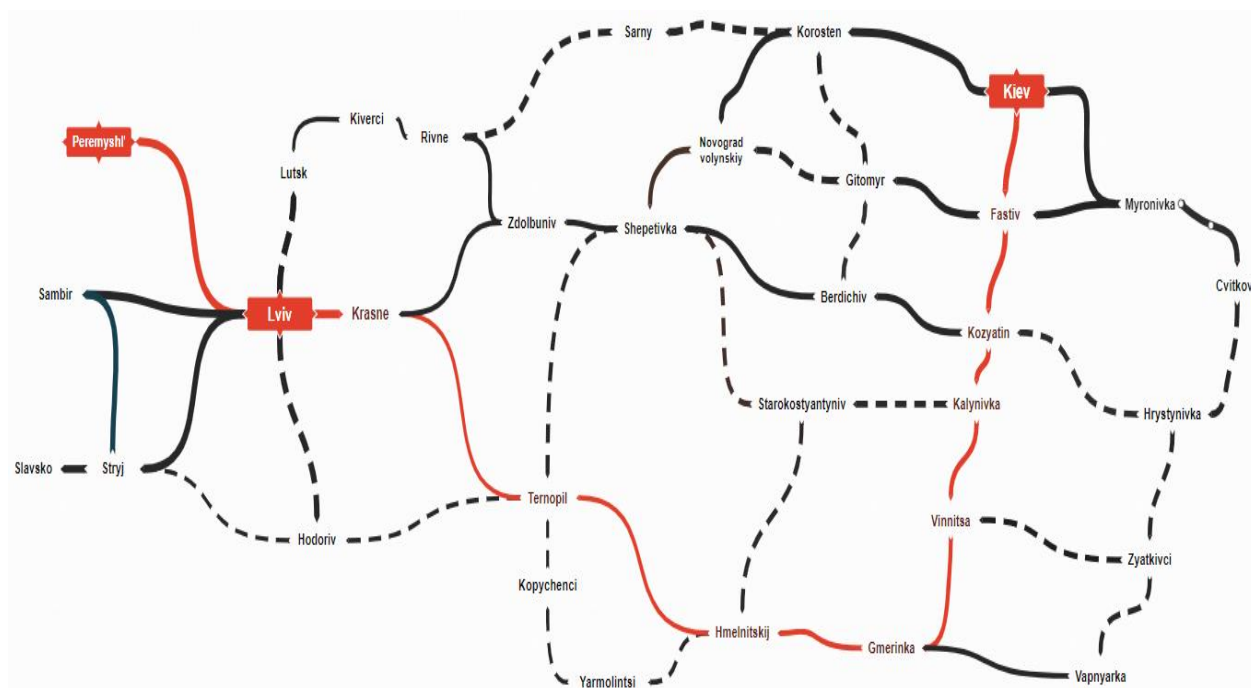


Рисунок 3.12 – Маршрут прямування поїзда №715 в нормальних умовах

Як бачимо з даного рисунку, система побудувала альтернативний маршрут (зеленого кольору) із залученням додаткового тепловозу через Хмельницький-Ярмолинці-Копичинці-Тернопіль. Далі, було проведено зміну розташування заданого поїзда зі станції Хмельницький на станцію Київ (рисунок 3.13)

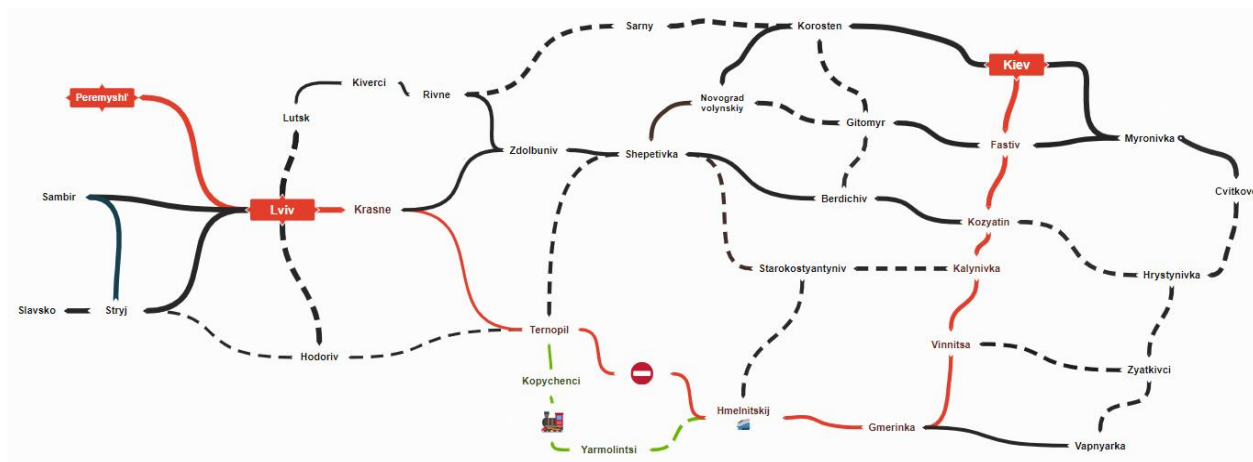


Рисунок 3.13– Маршрут прямування поїзда №715 при його знаходженні по ст. Хмельницький та пошкодженні ділянки Хмельницький-Тернопіль

Як бачимо з даного рисунку, система побудувала альтернативний маршрут (зеленого кольору) із залученням додаткового тепловозу через Хмельницький-Ярмолинці-Копичинці-Тернопіль. Далі, було проведено зміну розташування заданого поїзда зі станції Хмельницький на станцію Київ (рисунок 3.14). Система адаптувалася і запропонувала використання 2х «поїздів-шаттлів». Перший, зі станції Хмельницький до станції Козятин, другий зі станції Тернопіль до станції Красне (жовтий колір), а для самого поїзда №715 було запропоновано альтернативний маршрут зі станції Козятин до станції Красне (зелений колір).

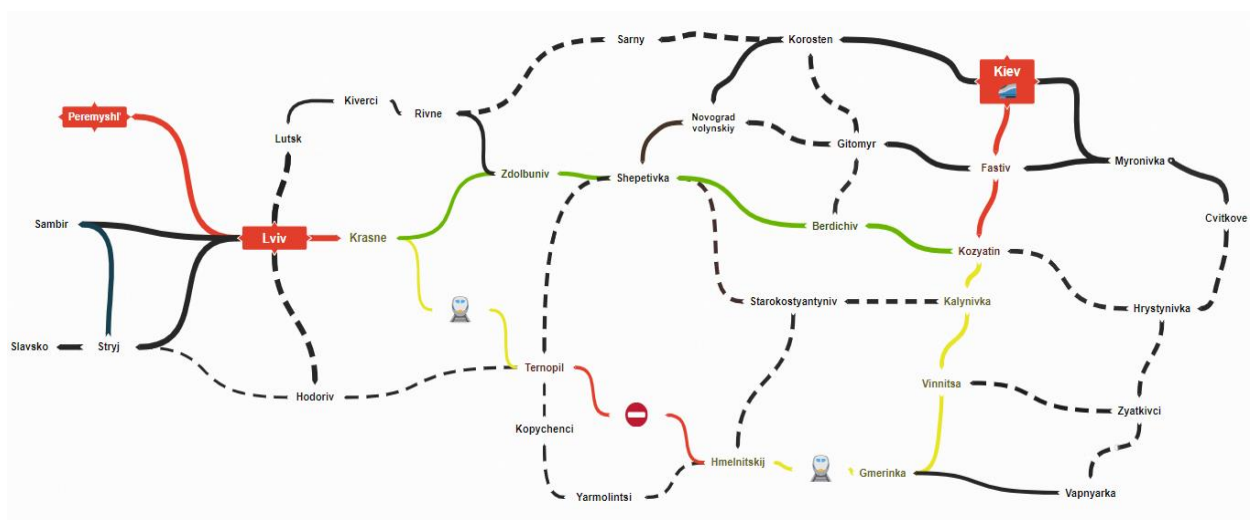


Рисунок 3.14 – Маршрут прямування поїзда №715 при його знаходженні по ст. Київ та залучені «поїзда-шаттла»

На наступному рисунку (рисунок 3.15) було імітовано повне унеможливлення залізничного сполучення між Києвом та Львовом шляхом руйнування 3х діляниць (Ківерці - Луцьк, Львів-Красне, Тернопіль-Ходорів). В цьому випадку система запропонувала прямування поїзда №715 нормальним маршрутом до станції Красне, далі зі станції Красне до станції Львів – з використанням автобусів (блакитний колір). Після чого пропонується зі станції Львів до станції Перемишль залучити «поїзд-шаттл» (жовтий колір).

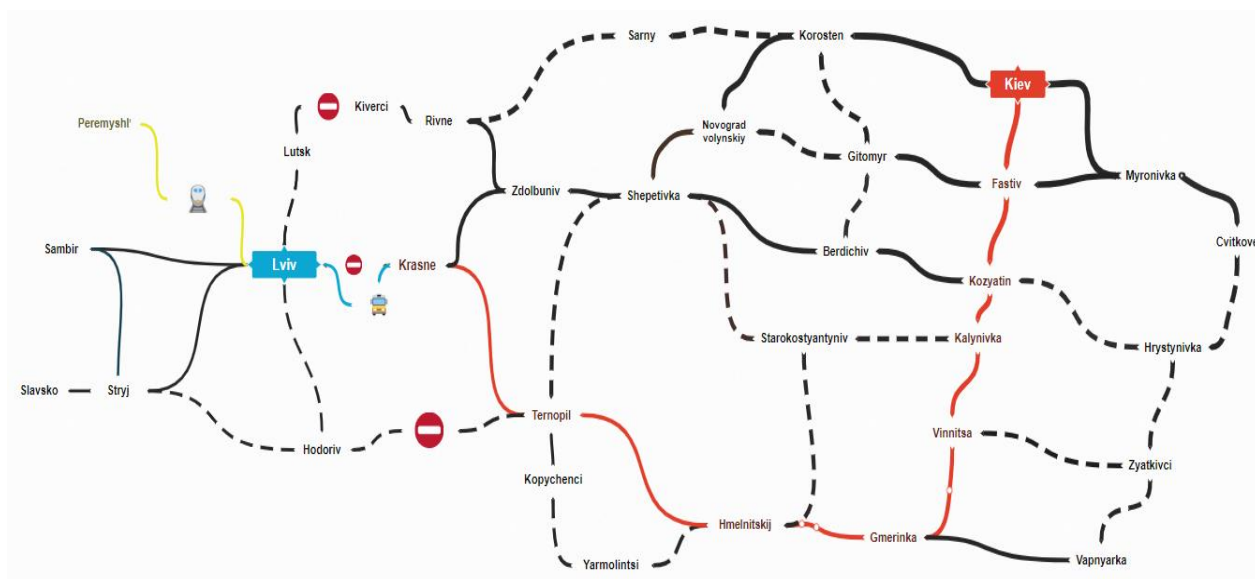


Рисунок 3.15 – Маршрут прямування поїзда №715 із залученням автобусу та «поїзда- шаттла»

Окрім цього, після формування альтернативного маршруту для певного поїзда, задля зменшення вірогідності зриву з графіку руху інших поїздів, автором запропоновано виведення на екран значень пропускнуї здатності для тих діляниць, які не входять в графіковий маршрут прямування. Оператор, керуючий рухом поїздів (ДНЦ), отримавши ці значення має порівняти їх з наявним графіком руху поїздів і лише після цього приймати остаточне рішення. Фрагмент програмного коду для реалізації моделі в Matlab евідено в додатку Н.

Розроблену автоматизовану технологію надання альтернативного маршруту пропонується інтегрувати у вигляді програмного продукту на автоматизовані робочі місця (АРМ) оперативного персоналу у вигляді системи підтримки прийняття рішень (СППР). Основною перевагою запропонованої технології є те, що незалежно від

кількості зруйнованих елементів заданого напрямку пасажирських перевезень представлено у вигляді зваженого графу, завжди знайдеться рішення щодо організації перевезення пасажирів з початкового до кінцевого пункту призначення. Впровадження такої технології надасть можливість значно підвищити надійності перевезень та, як наслідок, рівень конкурентоспроможності залізничного транспорту в загальній транспортній системі України.

3.6 Апробація отриманих результатів

Як вже було сказано в розділі 3.5, зазначена автоматизована технологія може суттєво скоротити час на прийняття оперативного рішення поїзним диспетчером, щодо подальшого прямування пасажирського поїзда, в разі пошкодження залізничної інфраструктури. Який, в свою чергу, складається з: часу необхідного для оцінки ситуації; часу для пошуку та вибору оптимального альтернативного маршруту; часу на реалізацію обраного рішення. Найдовшим проміжком часу, є саме час на пошук та вибір оптимального альтернативного маршруту.

Тому, для перевірки отриманої моделі на адекватність, було проведено ряд емпіричних досліджень, щодо швидкості та правильності знаходження оптимального рішення. Основними параметрами, від яких залежить швидкість пошуку та вибору оптимального рішення є кількість зруйнованих залізничних ділянок, кількість проміжних графікових зупинок та місцезнаходження заданого поїзда. Кількість зруйнованих ділянок приймалася від 1 до 4. Місцезнаходження поїзда задавалося або на початковій станції, або на певній проміжній вузловій станції. Згідно з математичної моделлю побудованої в розділі 3, якщо станція початкова, то в автоматизованій системі кількість пасажирів, посадка/висадка яких відбувається на проміжних графікових зупинках прораховується автоматично на основі моделі прогнозування, що запропонована в розділі 2, якщо поїзд знаходиться вже не на початковій станції, то ця кількість задається вручну, на основі кількості вже придбаних квитків.

Тестування проводилося на основі десяти різних змодельованих ситуацій пошкодження залізничної інфраструктури, які поступово ускладнювалися, із залученням чотирьох змін поїзних диспетчерів, по 5 ДНЦ в кожній (Додаток П). Критерієм оцінки був не лише час на прийняття рішення, а й його правильність (оптимальність). Графічно результати порівняння середнього часу на пошук та прийняття рішення наведено на рисунку 3.16.

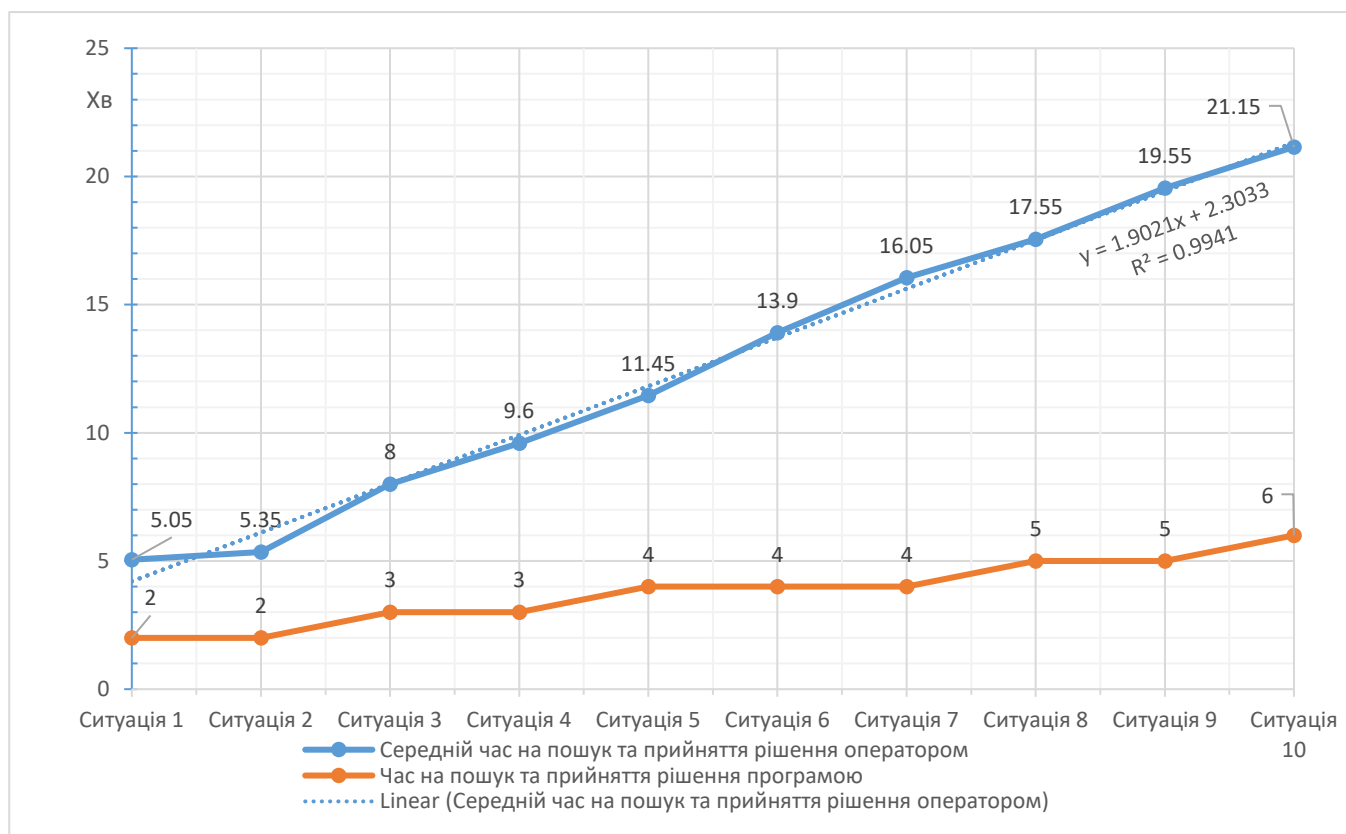


Рисунок 3.16 – Порівняльна динаміка середнього часу на пошук та прийняття рішення за допомогою запропонованої технології

Як бачимо з наведеного рисунку, з підвищенням рівня складності певної ситуації, різниця часу на прийняття рішення збільшується. Середньоквадратичне відхилення при цьому становить – 5,77. Середні значення отримані внаслідок аналізу даних, описуються лінійною функцією $y = 1,9021x + 2,3033$, з величиною достовірності апроксимації $R^2 = 0.9941$. У відсотковому співвідношенні час на прийняття рішення при використанні запропонованої технології зменшується на величину від 60 % до 75 %. Така різниця лише підтверджує корисність запропонованої технології

Як вже було сказано раніше, окрім часу на пошук та прийняття рішення, було також досліджено правильність (оптимальність) цього рішення. Результати наведено на рисунку 3.17.

З наведеного рисунку чітко видно, що зі збільшенням складності ситуації, зменшується вірогідність прийняття правильного (оптимального) рішення. У відсотковому еквіваленті дана різниця становить від 0% до 45 %.

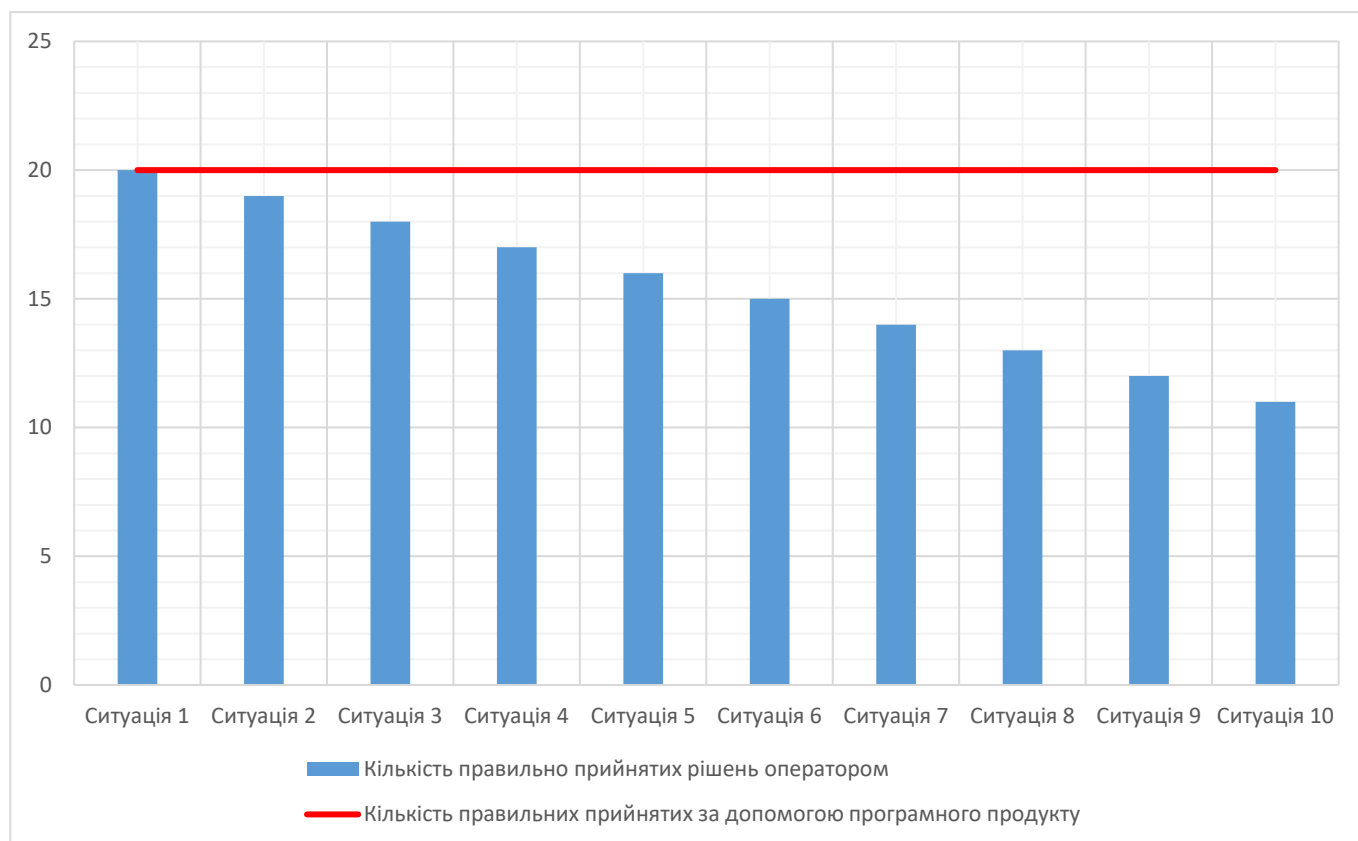


Рисунок 3.17 – Динаміка правильно прийнятих рішень

Таким чином, результати проведеної апробації підтверджують ефективність розробленої автоматизованої технології для підтримки прийняття рішень поїзними диспетчерами у випадках пошкодження залізничної інфраструктури. Використання цієї технології дозволяє значно скоротити час на пошук та вибір оптимального альтернативного маршруту, а також зменшує ризик прийняття неоптимального рішення.

3.7 Висновки до третього розділу

1. У межах проведеного дослідження розроблено комплексний метод оцінки ризику затримки пасажирських поїздів, який враховує імовірнісні характеристики виникнення пошкоджень залізничної інфраструктури під дією різних факторів ризику. Встановлено, що основними причинами пошкоджень є природні катаклізми, транспортні події та бойові дії. Для кожного фактора окремо розраховано індивідуальні ймовірності пошкодження залізничних дільниць, а також запропоновано механізм їх динамічного об'єднання в загальну ймовірність із урахуванням змін у структурі пошкоджень у часі.

Розроблена модель динамічного оновлення ваг дозволяє адаптивно реагувати на зміни зовнішніх умов, підвищуючи достовірність прогнозування потенційних загроз для залізничної мережі. Визначено, що ризик затримки пасажирських поїздів розраховується як добуток сумарної ймовірності пошкодження та математичного очікування величини затримки, що апроксимується нормальним законом розподілу за статистичними даними.

Отриманий ризик затримки інтегрується у розрахунок загального прогнозованого часу прямування пасажирського поїзда на альтернативних маршрутах. Застосування запропонованого методу дозволяє забезпечити точніше планування пасажирських перевезень, оперативніше реагувати на пошкодження інфраструктури та приймати обґрунтовані управлінські рішення в умовах надзвичайних ситуацій.

2. Застосовано теорію графів для моделювання та аналізу залізничних мереж, що є надзвичайно ефективним інструментом, який дозволяє оптимізувати транспортні операції. Представлення залізничних станцій у вигляді вершин, а залізничних шляхів у вигляді ребр графу дає можливість наочно уявити структуру мережі, аналізувати найкоротші та оптимальні маршрути, а також оцінювати час і відстань між станціями. Використання алгоритмів пошуку мінімальних шляхів та максимального потоку допомагає виявити вузькі місця і критичні точки мережі, що потребують модернізації чи розширення.

Обраний напрямок Київ-Львів був представлений у вигляді зваженого графу, де вершини представляють основні залізничні станції, а ребра – залізничні ділянки з вагою у вигляді часу на подолання кожної ділянки, наявності електрифікації та пропускної спроможності. Така модель дозволяє більш точно оцінювати час прямування поїздів і експлуатаційні витрати, що є важливим для формування альтернативних маршрутів.

Застосування «поїздів-шаттлів» та автомобільного транспорту для підвозу пасажирів у випадку пошкодження інфраструктури або проведення ремонтних робіт забезпечує гнучкість і ефективність транспортної системи. Це дає можливість швидко реагувати на непередбачувані ситуації та підтримувати високий рівень обслуговування пасажирів.

Загалом, використання теорії графів у плануванні залізничних перевезень дозволяє не лише оптимізувати маршрути, але й забезпечити надійність, безпеку та економічну ефективність транспортної мережі. Це сприяє покращенню задоволення пасажирів, підтриманню високої репутації компанії та її конкурентоспроможності на ринку пасажирських перевезень.

3. Встановлено, що формування альтернативних маршрутів у разі пошкодження залізничної інфраструктури є критично важливою задачею, яка забезпечує безперервність перевезень, мінімізацію економічних і соціальних втрат, а також підвищення рівня довіри пасажирів до залізничного транспорту. Запропонована оптимізаційна математична модель з цільовою функцією мінімізації підвищення експлуатаційних витрат (порівняно зі штатними витратами) дозволяє ефективно вирішувати цю задачу.

Модель враховує витрати на прямування альтернативним маршрутом, використання «поїздів-шаттлів» та автобусного транспорту, а також додаткові простої поїздів. Введення булевих змінних та інших параметрів у цільову функцію дозволяє гнучко моделювати різні сценарії та умови перевезень, забезпечуючи точність і надійність результатів.

Завдяки використанню даної математичної моделі можна оперативно визначати оптимальні альтернативні маршрути у випадку надзвичайних ситуацій, що дозволяє

мінімізувати час простою, зменшити експлуатаційні витрати та забезпечити своєчасне прибуття пасажирів до місця призначення. Це сприяє підвищенню ефективності управління залізничною мережею, забезпеченню її надійності та адаптивності до непередбачуваних умов, що є критично важливим для стійкості транспортної системи в цілому.

4. У даному розділі було продемонстровано процес створення моделі формування альтернативних маршрутів для пасажирського поїзда №715 сполученням Київ-Перемишль. Розроблена модель враховує такі фактори, як наявність електрифікації, пропускна спроможність ділянок, види транспорту, оперативна інформація щодо стану інфраструктури та багато інших параметрів. Також, було встановлено, що для пошуку оптимального рішення найбільш доцільне використання апарату генетичних алгоритмів. Важливою особливістю запропонованої моделі є можливість адаптації до різних умов і обмежень, що дозволяє швидко реагувати на непередбачені обставини та забезпечувати безперервність пасажирських перевезень.

Під час тестування моделі були розглянуті різні сценарії пошкодження інфраструктури, і було показано, як система пропонує альтернативні маршрути з використанням різних видів рухомого складу (тепловозів, «поїздів-шаттлів», автобусів). Застосування таких маршрутів забезпечує збереження високого рівня обслуговування пасажирів, знижуючи ризики виникнення затримок та можливих інших незручностей для пасажирів.

Впровадження розробленої технології було створено у вигляді програмного продукту для автоматизованих робочих місць оперативного персоналу у вигляді системи підтримки прийняття рішень (СППР), яка дозволить значно підвищити рівень надійності залізничних пасажирських перевезень та, в свою чергу, сприятиме підвищенню конкурентоспроможності залізничного транспорту в загальній транспортній системі України.

5. Проведено апробацію запропонованої системи, яка показала, що з підвищенням рівня складності певної ситуації, різниця часу на прийняття рішення збільшується. Середньоквадратичне відхилення при цьому становить – 5,77. Середні значення отримані внаслідок аналізу даних, описуються лінійною функцією

$y=1,9021x+2,3033$, з величиною достовірності апроксимації $R^2=0.9941$. У відсотковому співвідношенні час на прийняття рішення при використанні запропонованої технології зменшується на величину від 60 % до 75 %. Така різниця лише підтверджує корисність запропонованої технології. Також, було встановлено, що зі збільшенням складності ситуації, зменшується вірогідність прийняття правильного (оптимального) рішення. У відсотковому еквіваленті дана різниця становить від 0% до 45%.

РОЗДІЛ 4

ФОРМУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ НАДАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО МАРШРУТУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІД ЇЇ ВПРОВАДЖЕННЯ

4.1 Організація оперативного управління на мережі українських залізниць

Якщо трохи зануритись в термінологію, то саме слово управління слід розуміти, як вплив цілеспрямованих дій на об'єкт або процес, що призводить в результаті до якісної і кількісної зміни факторів. Дані фактори визначають стан об'єкта або процесу, в результаті чого досягається конкретна мета. До основних функцій управління можна віднести: планування, облік, оперативне управління та контроль за визначеними процесами [60]. Зазвичай, управління спрямоване на довгострокове планування, визначення стратегічних цілей і загальних напрямків розвитку організації або процесу, воно, охоплює всі рівні і аспекти діяльності, від стратегічного планування до забезпечення ресурсами.

У випадках, коли необхідно сфокусуватися на конкретних оперативних завданнях, часто на нижчому рівні управління, які орієнтовані на короткострокові періоди та потрібно організувати негайне реагування на зміни або проблеми, що виникли, застосовується оперативне управління (ОУ).

Оперативне управління (ОУ) – представляє собою одну з основних функцій управління виробництвом і вона полягає в інтервальній розробці оперативних планів та постійній організації контролю і регулювання їх виконання. Основною складовою частиною ОУ є диспетчерське керівництво, систематичний облік і контроль за ходом виконання оперативних планів і регулювання ходу виробництва [94].

Одним з ключових одним з ключових елементів оперативного управління на залізничному транспорті є - планування та контроль руху поїздів, що включає до себе:

- Створення розкладів, які враховують не лише технічні можливості, а й потреби пасажирів.

- Визначення найкращих маршрутів для зменшення часу в дорозі та витрат на паливо;
- Аналіз попиту на перевезення та коригування графіків для забезпечення максимального завантаження поїздів.
- Використання систем слідкування для контролю за положенням поїздів в реальному часі;
- Використання інформаційних систем для збору даних про рух поїздів, навантаження, затримки тощо.
- Швидка реакція на затримки, викликані різними факторами (погодні умови, технічні несправності тощо), та коригування графіків.
- Інформування пасажирів про зміни в розкладі через різні канали (електронні табло, мобільні додатки, веб-сайти).
- Розробка чітких протоколів на випадок аварій, катастроф або техногенних ситуацій.

Оперативне управління також включає ефективне управління ресурсами, до якого відноситься контроль за станом локомотивів і вагонів, планування технічного обслуговування та ремонтів, оптимізація роботи обслуговуючого персоналу та регулярна перевірка стану і обслуговування залізничної інфраструктури для запобігання аваріям.

Оперативне управління також тісно пов'язано з управлінням ризиками, особливо на залізничному транспорті, де виконання безпеки руху поїздів та постійне покращення ефективності перевезень є першочерговими завданнями.

Кожен елемент оперативного управління, від планування до виконання, вимагає врахування можливих негативних відхилень, що підкреслює необхідність розуміння ризиків у процесі прийняття рішень.

В умовах нестабільного середовища, яке може включати природні катастрофи, техногенні аварії або бойові дії, оперативне управління повинно бути адаптивним та швидким. Це передбачає не лише своєчасне реагування на вже виниклі проблеми, але й про активне прогнозування ситуацій, що можуть негативно вплинути на роботу залізничного транспорту. Використовуючи методи управління ризиками, організації

можуть ідентифікувати та оцінювати потенційні загрози, формуючи стратегії для їх мінімізації. Це дозволяє оперативним менеджерам забезпечувати безпеку пасажирів, дотримання графіків руху поїздів і зменшення експлуатаційних витрат [121].

Крім того, важливо зазначити, що деякі ризики потрібно враховувати і при підрахунках можливого економічного ефекту від запровадження певної технології. Наприклад, вивчення певних умов, які можуть призвести до затримок, може відкрити нові можливості для оптимізації маршрутів або підвищення ефективності роботи. Це дозволяє деяким транспортним компаніям не лише зменшити витрати, але й знайти способи покращення обслуговування клієнтів, що в кінцевому підсумку вплине на їхню лояльність та залучення нових пасажирів [122].

Для зменшення ризику виникнення нестандартних ситуацій на залізничному транспорті використовуються різні заходи: регулярна перевірка технічного стану рухомого складу та інфраструктури, проведення планових ремонтів, підготовка та навчання персоналу, встановлення різних систем автоматичного контролю та інші. [123].

Таким чином, інтеграція управління ризиками в оперативне управління є критично важливою для забезпечення не тільки безпеки, але й економічної ефективності залізничного транспорту. Це створює основу для формування стабільних і конкурентоспроможних бізнес-процесів, що відповідають сучасним вимогам ринку.

Як вже було сказано, альтернативний маршрут - це резервний шлях, який використовується для продовження поїздок в обхід зруйнованих ділянок чи станцій. Формування альтернативних маршрутів для швидкісних пасажирських поїздів у разі пошкодження залізничної інфраструктури є одним з найяскравіших прикладів, коли необхідне саме оперативне управління. В цьому випадку, найбільший рівень відповідальності за організацію руху поїздів на себе бере диспетчерський апарат філії «УЗШК» та виробничі підрозділи «Служба роботи станцій» (Д) та «Центр управління рухом поїздів» (ЦУР) в межах тих регіональних філій в яких відбулося пошкодження або які будуть задіяні при формуванні альтернативного маршруту [15].

Загалом, мережа українських залізниць складається з шести регіональних філій, які в свою чергу поділяються на регіони, а кожен регіон розбитий на окремі диспетчерські дільниці. Наприклад, регіональна філія «Південно-західна залізниця», через яку проходять усі маршрути прямування пасажирських поїздів, заданого в 3 розділі львівського напрямку, поділяється на 5 регіонів (Київський, Козятинський, Жмеринський, Коростенський та Конотопський) та 23 диспетчерські дільниці, схематично зображено на рисунку 4.1.

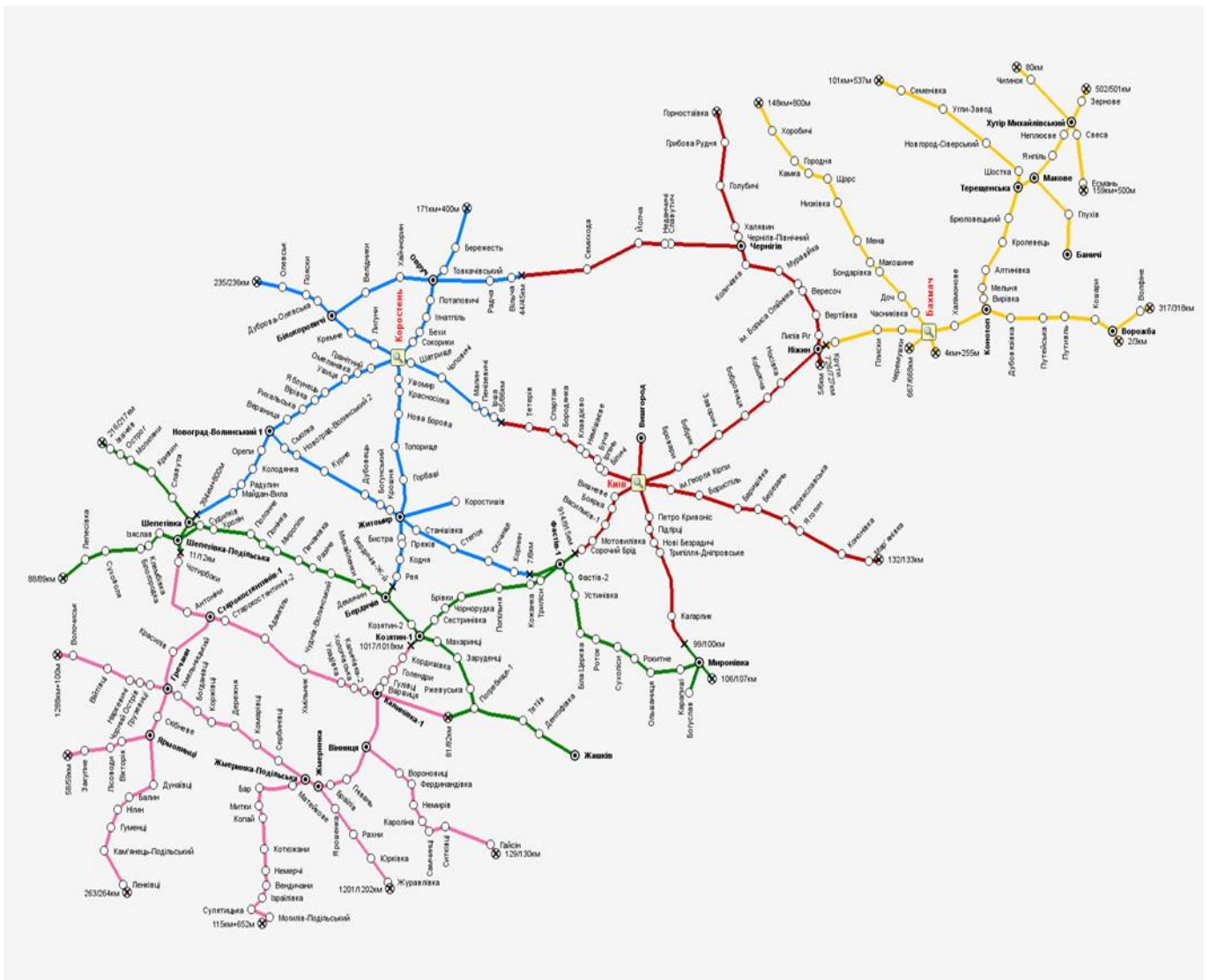


Рисунок 4.1 Схема розташування регіонів на регіональній філії «Південно-західна залізниця»

Кожен з вищевказаних підрозділів має свою мету та завдання. Так, метою ЦУР є задоволення потреб перевезення пасажирів, вантажів, зокрема небезпечних

вантажів, багажу, вантажобагажу і пошти залізничним транспортом у внутрішньому та міжнародному сполученнях. Виконання цієї мети досягається за рахунок вирішення таких завдань, як: організація управління процесом перевезень, регулювання напрямку вагонопотоків та забезпечення безперебійності перевізного процесу, вирішення питань ефективного використання рухомого складу на дирекціях залізничних перевезень, керування та контроль розробки графіку руху поїздів, порядку напрямків вагонопотоків та формування їх у поїзди згідно з планом формування поїздів залізничними станціями.

Усього, на мережі Українських залізниць існує 5 ЦУРів, які розташовані в Києві, Харкові, Львові, Дніпрі та Одесі, кожен з яких підпорядковується безпосередньо «Департаменту управління рухом» в місті Київ. Аналогічно, «Департаменту управління рухом» підпорядковується і диспетчер УЗШК. Основним працівником в межах ЦУР, який одноосібно керує рухом поїздів на заданій дільниці – є поїзний диспетчер (ДНЦ), в обов'язки якого входить:

- максимально використовувати технічні засоби для забезпечення заданих розмірів руху, скорочення часу обробки поїздів на станціях, ефективно використовувати вагонний парк, локомотиви та пропускну спроможність;

- здійснювати контроль за роботою станцій і вживати заходів щодо забезпечення виконання завдань з формування та відправлення поїздів відповідно до графіка руху і плану формування поїздів;

- своєчасно давати вказівки з руху поїздів черговим по станціях, а в разі необхідності - машиністам поїзних локомотивів, складачам поїздів;

- стежити за прийманням та відправленням поїздів на станціях, особливо при порушеннях нормальної роботи пристроїв СЦБ і зв'язку, під час обгонів і схрещень довгосоставних, великовагових, з небезпечними і негабаритними вантажами поїздів з іншими поїздами та за прямуванням поїздів по перегонах, вживати заходів для забезпечення безпечного і своєчасного просування поїздів [125].

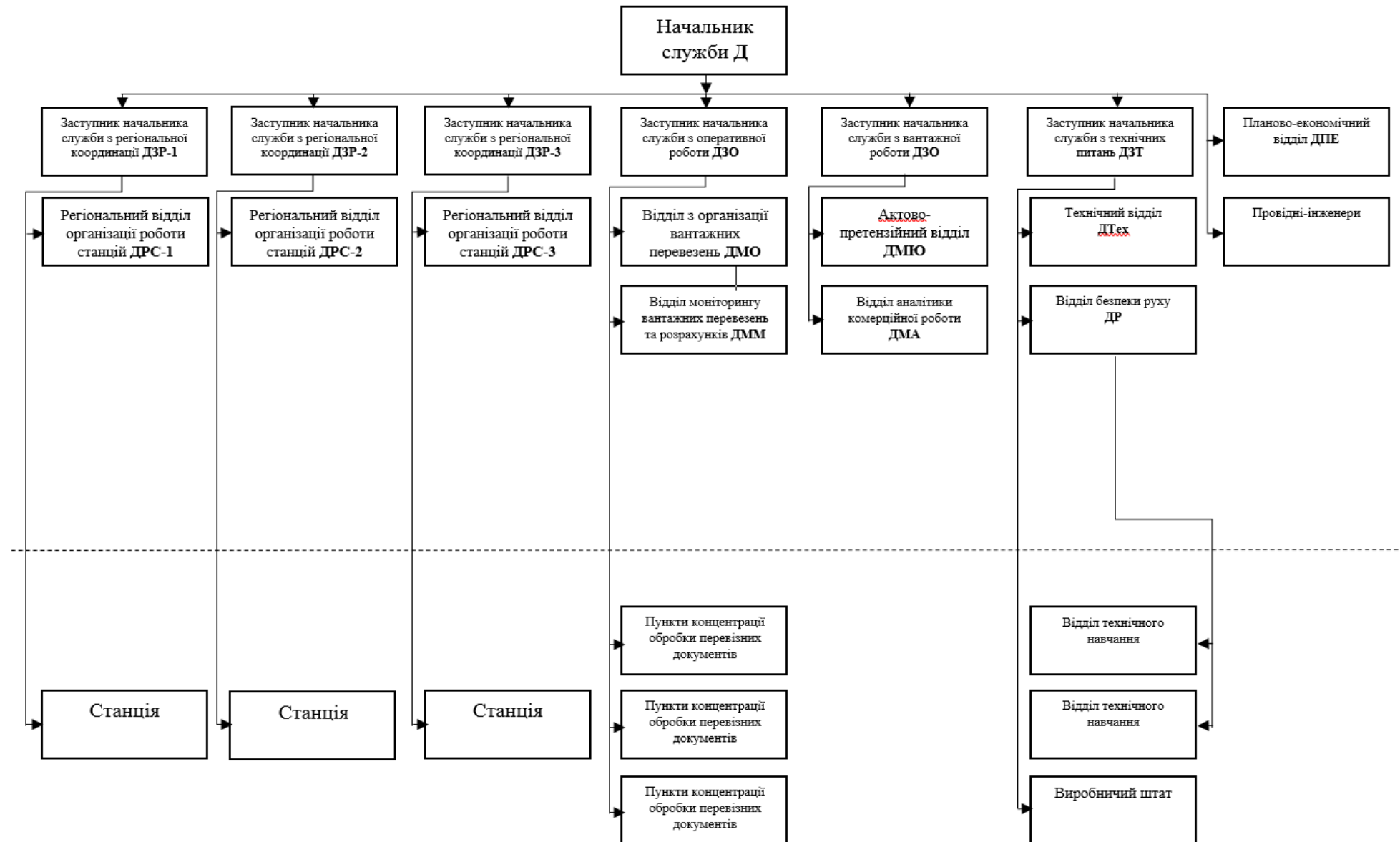
«Служба роботи станцій» в свою чергу забезпечує своєчасне і якісне перевезення пасажирів, вантажу, вантажобагажу та пошти з безумовним забезпеченням безпеки руху поїздів та збереження вантажу, організовує та забезпечує

рух поїздів за графіком, досліджує ринок транспортних послуг, розробляє та погоджує з відповідними службами перспективні плани розвитку та розширення сфери транспортного обслуговування, інфраструктури та рухомого складу, контролює виробничо-фінансову діяльність дирекції, формування та виконання фінансових планів структурних підрозділів дирекції. А також, забезпечує комплексний розвиток та зміцнення матеріально-технічної бази господарств дирекції, охорону навколишнього середовища від забруднення та інших шкідливих впливів, забезпечує готовність технічних підрозділів до дій в умовах надзвичайних ситуацій, організовує та керує роботами з ліквідації їх наслідків, визначає обсяги перевезень вантажів для структурних підрозділів дирекції, відповідно до затверджених обсягів перевезень, доводить їм норми забезпечення рухомим складом, забезпечує виконання плану перевезень вантажу та пасажирів, впровадження єдиної науково-технічної та інвестиційної політики підвищення технічного оснащення виробництва, удосконалення технологічних процесів, впровадження світового досвіду.

Окрім цього, забезпечує мобілізаційну готовність технічних засобів дирекції та готовність до роботи в екстремальній ситуації захисних споруд і спеціальних об'єктів, розробляє і забезпечує реалізацію заходів щодо захисту державної, службової та комерційної таємниці і впроваджує систему колективної безпеки, забезпечує контроль розрахунків за виконані роботи й послуги та своєчасне надходження коштів за надані транспортні послуги.

Також, саме «Служба роботи станцій» задля забезпечення більш ефективного рівня оперативного управління веде координацію перевезень, які включають пересадку між поїздами та автобусами або таксі. Організаційна структура виробничого підрозділу «Служба роботи станцій» розміщена на рисунку 4.2.

Рисунок 4.2 Організаційна структура виробничого підрозділу «Служба роботи станцій»



4.2 Формування системи оперативного управління пасажирськими перевезеннями після запровадження технології

В реальних умовах, після пошкодження залізничної інфраструктури, взаємодія між працівниками, які відповідальні за організацію руху виглядає наступним чином (рис. 4.3)

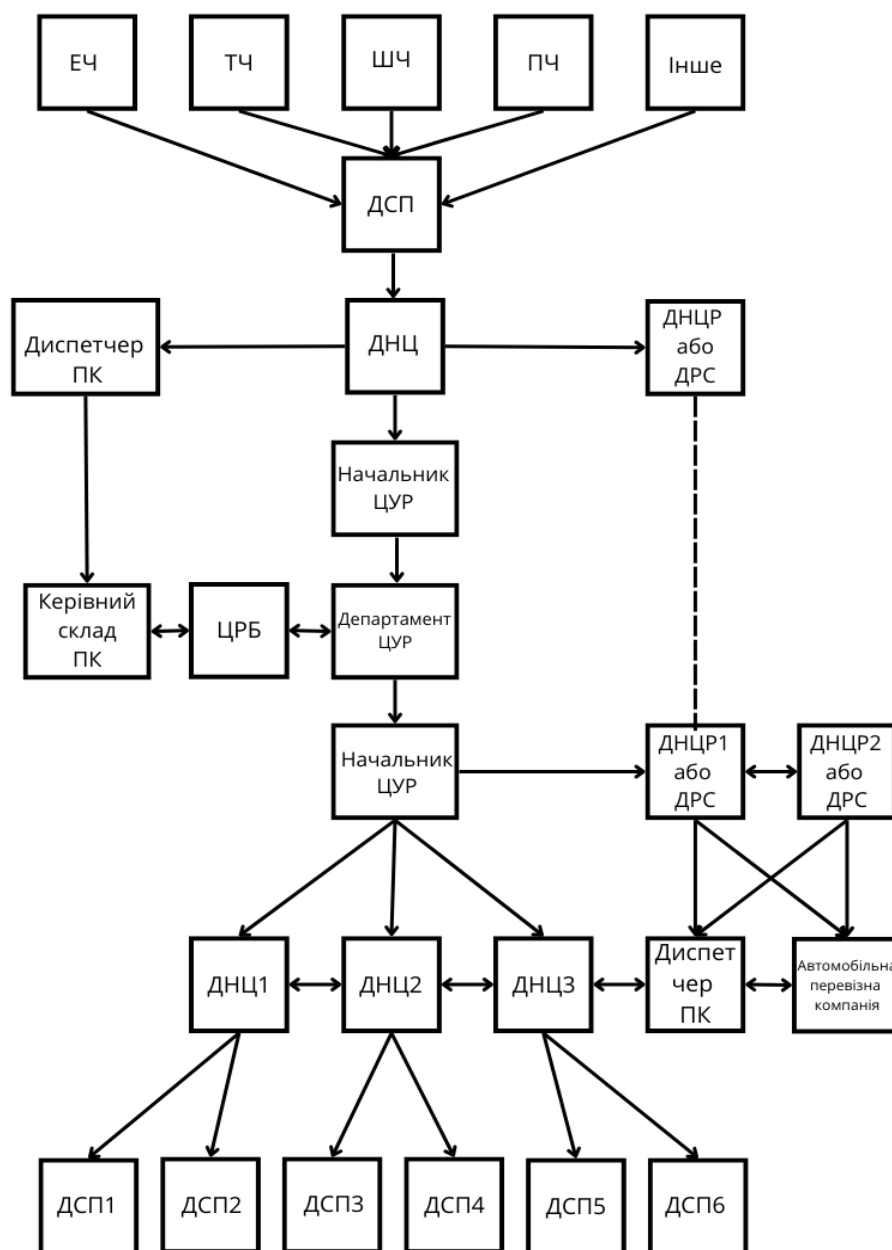


Рисунок 4.3 – Схема взаємодії працівників «Служби роботи станцій», ЦУР та ПК при пошкодженні залізничної інфраструктури до впровадження автоматизованої технології.

Першим, хто дізнається про пошкодження певного елементу залізничної інфраструктури може бути як працівник залізниці (машиніст, працівник служби колії, енергетики або зв'язку, воєнізована охорона (ВОХР), тощо), так і певна стороння особа (пасажир, випадковий перехожий, тощо.). Після чого, вхідна інформація щодо пошкодження певної ділянки інфраструктури передається до чергового найближчої станції (ДСП). Отримавши інформацію, щодо пошкодження залізничної інфраструктури та її поточного стану, черговий по станції передає поїзному диспетчеру заданої ділянки (ДНЦ). Поїзний диспетчер, отримавши інформацію про задане пошкодження залізничної інфраструктури (нестандартну ситуацію) передає її черговому по відділенню (ДНЦР, в минулому ДГП) або начальнику регіонального відділу організації роботи станцій (ДРС), керівнику центру управління рухом поїздів (ЦУР) в межах управління якого сталося пошкодження інфраструктури та диспетчеру філії «Пасажирська кампанія», який отримавши вхідну інформацію про пошкодження залізничної інфраструктури від ДНЦ узгоджує порядок подальших дій з власним керівним складом. Начальник ЦУР отримавши інформацію про пошкодження залізничної інфраструктури передає її в Департамент ЦУР. Після чого, департамент, проводить оперативну нараду разом з ревізорським апаратом та керівним складом філії УЗШК, де приймається рішення, щодо подальшого прямування заданого швидкісного поїзда [4].

Після прийняття рішення, департамент ЦУР, передає його знов начальнику ЦУР, а він, в залежності від обраного альтернативного маршруту швидкісного пасажирського поїзду передає вже інформацію тим ДНЦ, ДНЦР або ДРС ділянки та регіони яких мають бути задіяні.

Якщо прийняте рішення несе в собі використання додаткового «поїзда-шаттлу», то ДРС або ДНЦР додатково зв'язується з диспетчером пасажирської кампанії, щодо виділення додаткових пасажирських вагонів для подальшого транспортування пасажирів та з поїзними диспетчерами, щодо знаходження та виділення додаткового локомотиву та локомотивної бригади для створення «поїзду-шаттлу».

У випадку якщо потрібне залучення автомобільного транспорту, то ДРС або ДНЦР, зв'язується з певним виробничим підрозділом, який знаходиться найближче до місця заданого пошкодження залізничної інфраструктури та має на своєму балансі автобуси, або до найближчих приватних перевізників з вимогою надання декількох автобусів для подальшого транспортування пасажирів. Після чого, уся інформація, що надійшла надається поїзним диспетчерам нових задіяних дільниць, а від них, черговим по станціям. При чому, поїзні диспетчера разом з черговими по станціями мають забезпечити безпечний пропуск альтернативним маршрутом поїзда УЗШК, надаючи йому при цьому найбільшу пріоритетність [4].

Варто також зазначити, що схема взаємодії працівників вказана на рисунку 4.3, актуальна лише для тих випадків, коли після пошкодження залізничної інфраструктури, дільниця закривається повністю. У випадку, коли пошкодження інфраструктури дозволяє прослідувати поїзду дільницю власним ходом по неправильній колії або з використанням тепловозу, процес організації подальшого руху значно простіше - без залучення ЦРБ та департаменту ЦУР. Тому, в дисертаційній роботі, сформована автоматизована система надання альтернативних маршрутів для цих випадків не надається.

Проте, такий існуючий підхід, щодо організації руху швидкісного поїзда, через велику кількість залучених працівників може займати багато часу, який безпосередньо збільшує величину простою пасажирського поїзда, а відповідно і величину додаткових витрат. Для того, щоб зменшити величину простою, а відповідно і виплат, впровадження запропонованої оптимізаційної моделі у розділі 3, провести наступним чином [126].

Створений програмний продукт рекомендовано встановити на автоматизовані робочі місця поїзного диспетчера (АРМ ДНЦ) та диспетчерів філії «пасажирська кампанія». Це дасть змогу значно швидше прийняти рішення стосовно подальшого руху заданого поїзду, зменшує вірогідність людської помилки стосовно оптимальності прийнятого рішення.

Інтеграцію запропоновано зробити у вигляді додаткової вкладки «Альтернативний маршрут» в розділі «Запити». Після чого, необхідно буде вказати

маршрут прямування поїзда та його графікові зупинки, його місцезнаходження, наявність підв'язки під інший поїзд та дільницю чи станцію, яку необхідно виключити із системи. Внаслідок чого, система покаже графічну інтерпретацію альтернативного маршруту на основному полі та значення часу прямування кожним видом транспорту, пропускної спроможності нових задіяних дільниць, кількості необхідних вагонів або автобусів, тощо, в підрозділі «Умови». Графічний приклад застосування запропонованого програмного продукту в АРМ ДНЦ наведено на рисунку 4.4.

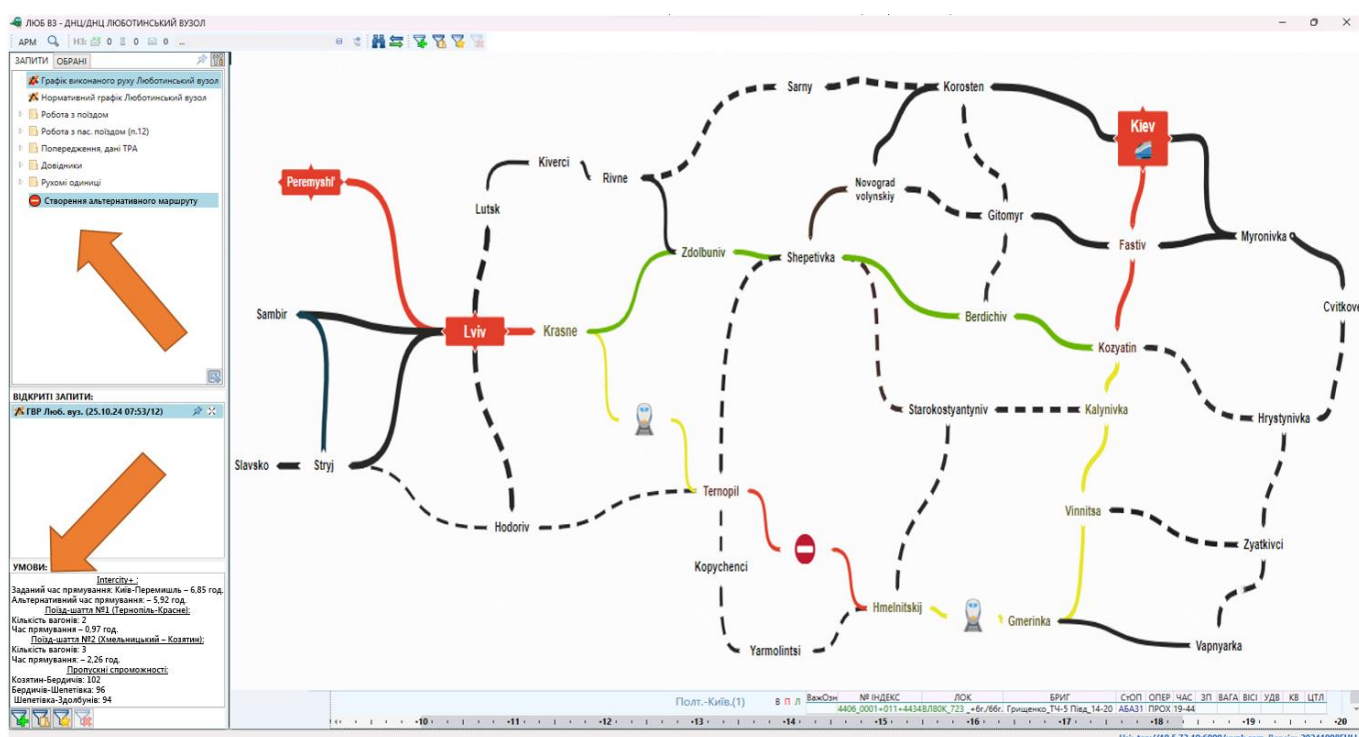


Рисунок 4.4 – Ескіз інтерфейсу запропонованої системи підтримки прийняття рішень на базі АРМ ДНЦ

Також, впровадження запропонованої автоматизованої технології, з часом дозволить відмовитись від проведення оперативних нарад на рівні департаменту ЦУР та приймати рішення на рівні ДНЦ та начальника ЦУР. Схема взаємодії працівників служби роботи станцій, ЦУР та диспетчера філії «Пасажирська кампанія» при пошкодженні залізничної інфраструктури після впровадження автоматизованої технології показана на рисунку 4.5

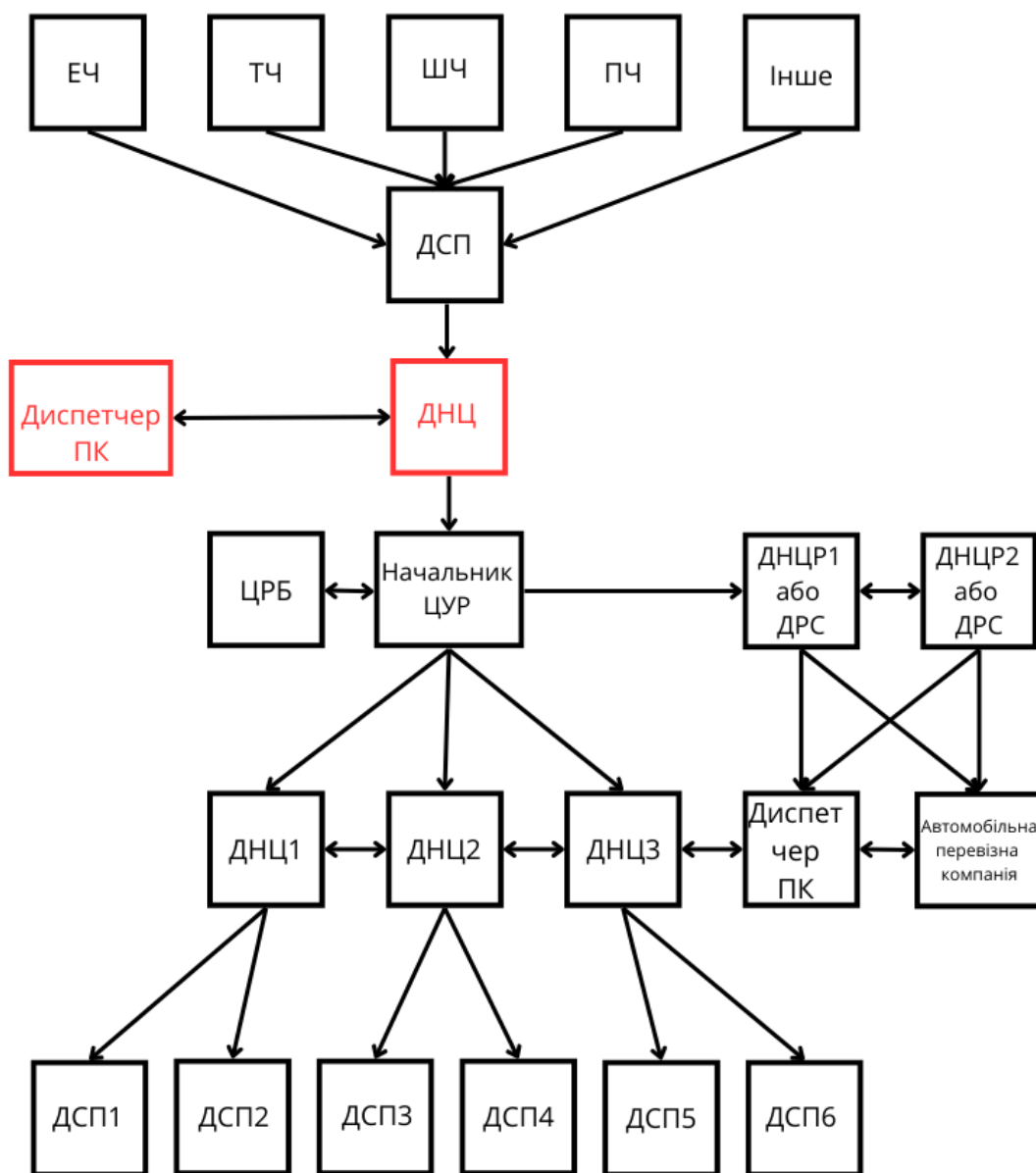


Рисунок 4.5 – Схема взаємодії працівників служби роботи станцій, ЦУР та УЗШК при пошкодженні і залізничної інфраструктури після впровадження автоматизованої технології.

Таким чином, пошкодження залізничної інфраструктури є серйозною проблемою, що має значні соціальні, технічні та економічні наслідки. Розглянуті причини, зокрема природні катаклізми, техногенні катастрофи, транспортні події та військові дії, підкреслюють необхідність своєчасного реагування та адаптації системи для зменшення негативних наслідків. Запропонована автоматизована технологія надання альтернативного маршруту швидкісним пасажирським поїздам, дозволить суттєво скоротити час простою в очікування рішення та знайти найбільш

оптимізаційне рішення, що підвищить ефективність роботи залізничної інфраструктури в умовах надзвичайних ситуацій.

4.3 Оцінка економічного ефекту від впровадження запропонованої технології

Забезпечення надійного залізничного сполучення є ключовою задачею транспортної інфраструктури, зокрема для швидкісних пасажирських поїздів. Проте, залізничні перевезення можуть бути порушені через пошкодження інфраструктури як у мирний, так і у воєнний час. Випадки пошкодження залізничних колій або об'єктів можуть виникати через різні фактори: від природних катастроф (повені, землетруси) до техногенних аварій або терористичних актів. В умовах воєнних дій загроза таких пошкоджень значно зростає, що вимагає оперативного реагування з боку транспортних операторів [7].

Окрім загроз, пов'язаних із руйнуванням інфраструктури, важливим чинником перерв у русі (як вже показано в розділі 3), є планові ремонти та реконструкції залізничних дільниць. Регулярне технічне обслуговування, модернізація залізниць, або впровадження нових технологій можуть вимагати тимчасового закриття певних ділянок, що також впливає на безперервність руху. У таких випадках альтернативні маршрути повинні бути заздалегідь розроблені та інтегровані в транспортні системи для мінімізації затримок та забезпечення зручності пасажирів [9].

Для ілюстрації проблеми було проведено розрахунки на прикладі швидкісного поїзда №715 сполученням Київ—Львів, який в момент пошкодження знаходиться по станції Фастів та має підв'язку під інші поїзди по станції Перемишль. Цей поїзд здійснює графікові зупинки на проміжних станціях Вінниця, Хмельницький, Тернопіль та Львів з величиною посадки/висадки пасажирів: 69/34, 40/29, 18/34 та 101/65 відповідно. Для розрахунку економічного ефекту було змодельовано руйнування залізничної інфраструктури на станції Калинівка, що повністю виключає залізничні підходи до неї. У такій ситуації виникає необхідність оперативного пошуку альтернативного маршруту, щоб зберегти нитку графіку руху поїзда та уникнути тривалих затримок.

Варто зазначити, що запропонована модель може бути застосована не лише для швидкісних пасажирських поїздів, таких як поїзд 715 Київ—Львів, але й для звичайних пасажирських та швидких поїздів. Система автоматизованого планування альтернативних маршрутів, заснована на сучасних технологіях обробки даних та моніторингу залізничної інфраструктури, є універсальною і може ефективно функціонувати для різних типів залізничного транспорту.

Економічний ефект від впровадження автоматизованої технології надання альтернативних маршрутів, за розрахунковий період, визначається за формулою:

$$\Delta E_T = E_{T1} - E_{T2} = \sum_{t=1}^n (P_{t1} - Z_{t1}) \times \alpha_t - \sum_{t=1}^n (P_{t2} - Z_{t2}) \times \alpha_t \quad (4.1)$$

де E_{T1} – економічний ефект, що отримує АТ «УЗ» без впровадження запропонованої технології до розрахункового року;

E_{T2} – економічний ефект що отримує АТ «УЗ» після впровадження сформованої технології до розрахункового року;

P_{t1} – доходи від перевезень за розрахунковий період без впровадження запропонованої технології;

P_{t2} – доходи від перевезень за розрахунковий період після впровадження запропонованої технології;

Z_{t1}, Z_{t2} – витрати на перевезення без впровадження та з впровадженням запропонованої технології;

α_t – коефіцієнт приведення результатів і затрат до розрахункового року;

n – кількість років розрахункового періоду.

Оскільки впровадження технології надання альтернативних маршрутів не вплине на доходи залізниці, а відбудеться лише скорочення експлуатаційних витрат ($P_{t1}=P_{t2}$), то формула 4.2 прийме наступний вигляд:

$$\Delta E_T = \sum_{t=1}^n (Z_{t1} - Z_{t2}) \times \alpha_t, \quad (4.2)$$

Приведення результатів і витрат різних років періоду реалізації проекту до розрахункового року здійснюється множенням їх вартісної оцінки за кожний рік на коефіцієнт приведення α , що відповідає даному року.

Результати витрат за різні роки приведемо до першого року життєвого циклу проекту, тобто визначимо значення суми витрат в теперішній вартості грошей (метод дисконтування), тобто на 2024 рік, тоді коефіцієнт приведення α_t визначимо за формулою:

$$\alpha_t = \frac{1}{[(1 + E_n)(1 + I + P)]^{t-t_p}}, \quad (4.3)$$

Де, E_n – норматив приведення різночасних витрат і результатів, чисельно дорівнює коефіцієнту ефективності капітальних вкладень ($E_n=0,14$);

t – порядковий номер останнього року розрахункового періоду (проведемо розрахунки на найближчі 5 років);

t_p – порядковий номер року здійснення заходу, що приводиться до розрахункового (першого) року;

I – очікуваний середньорічний темп інфляції протягом життєвого циклу проекту, що за даними НБУ, в середньому, очікуються на рівні 7%;

P – ризик виникнення непередбачених витрат або можливого збою в роботі програмного продукту, ($P = 2\%$).

$$\alpha_{t_{2024}} = \frac{1}{[(1 + 0,14)(1 + 0,07 + 0,02)]^{1-1}} = 1;$$

$$\alpha_{t_{2025}} = \frac{1}{[(1 + 0,14)(1 + 0,07 + 0,02)]^{2-1}} = 0,8;$$

$$\alpha_{t_{2026}} = \frac{1}{[(1 + 0,14)(1 + 0,07 + 0,02)]^{3-1}} = 0,66;$$

$$\alpha_{t_{2027}} = \frac{1}{[(1 + 0,14)(1 + 0,07 + 0,02)]^{4-1}} = 0,52;$$

$$\alpha_{t_{2028}} = \frac{1}{[(1 + 0,14)(1 + 0,07 + 0,02)]^{5-1}} = 0,42.$$

Так, подивившись на сформований граф в розділі 3 (рисунок 3.1), можна побачити, що при руйнуванні залізничної інфраструктури, по станції Калинівка, що несе за собою неможливість використання усіх залізничних підходів до неї, найбільш простішим виходом із заданої ситуації, на перший погляд, є побудова альтернативного маршруту, із використанням додаткового тепловозу, та прямування основним поїздом через станції Козятин-Христинівка-Зятківці-Вінниця, без залучення «поїзда-шаттлу» або автомобільного транспорту (рис 4.6).

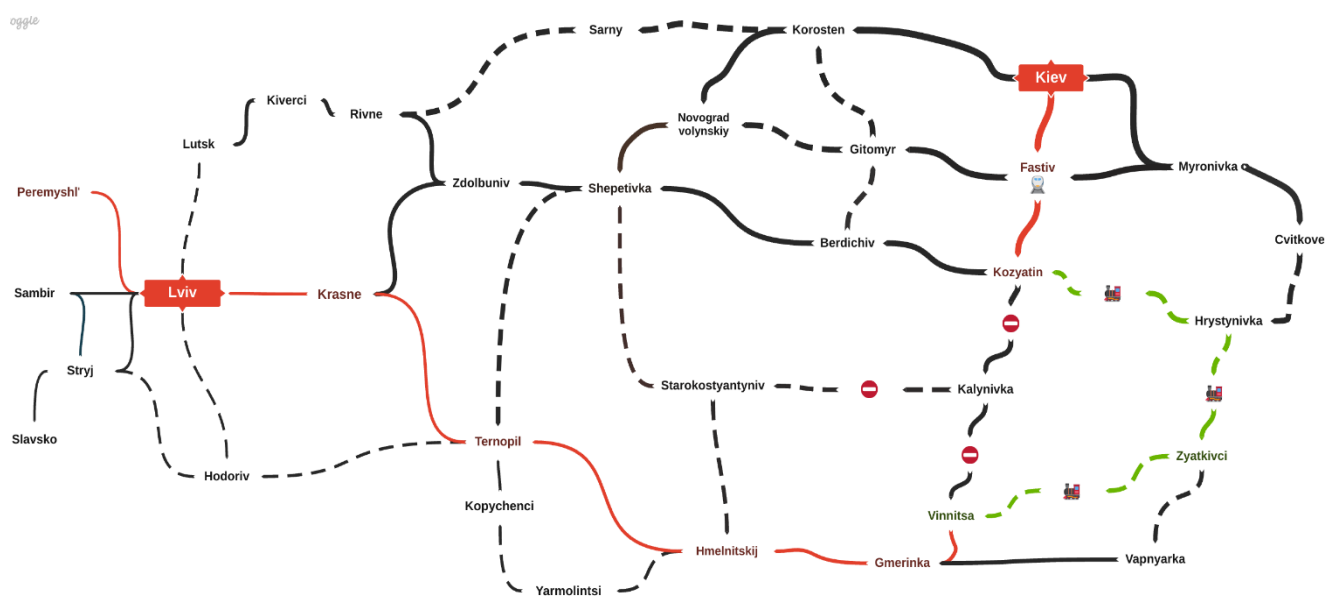


Рисунок 4.6 Схема альтернативного маршруту для поїзда 715 до впровадження запропонованої технології

В цьому випадку, не є важливим скільки пасажирів повинно вийти або сісти на проміжних графікових зупинках, оскільки альтернативний маршрут проходить через кожен з них. Величина загальних витрат для цього випадку обчислюється за формулою:

$$E_{T1} = \sum_{i=1}^7 C_{\text{ел}} * t_{\text{ел } i} + C_{\text{пр}} * t_{\text{пр}} + C_{\text{орг_тепл}} + \sum_{j=1}^3 C_{\text{тепл}} * t_{\text{тепл } j} + C_{\text{пр}}(t_{\text{дод}} - t_{\text{норм}}) \quad (4.4)$$

Де, i – кількість задіяних електрифікованих ділянок для альтернативного маршруту;

$t_{\text{ел } i}$ – час, який заданий поїзд (УЗШК) прямував альтернативним маршрутом на електротязі, з Фастова до Козятина та з Вінниці до Перемишля – 5,71 год.;

$C_{\text{ел}}$ – вартість однієї поїздогодини при прямуюванні на електротязі, за даними АТ УЗ за 2023 рік становить - 7517 грн./год.;

$t_{\text{пр}}$ – час, який поїзд простояв для очікування допоміжного локомотива, приймаємо 0,5 год.;

$C_{\text{пр}}$ – вартість однієї години простою пасажирського поїзду, за даними АТ УЗ за 2023 рік становить - 3040,88 грн./год.;

$C_{\text{орг_тепл}}$ – разові організаційні витрати на залучення тепловоза. До них відносяться витрати на проведення маневрів, прямуювання до станції з якої необхідно забрати поїзд, тощо. Для заданого випадку становить 6000 грн.;

j – кількість задіяних неелектрифікованих ділянок для альтернативного маршруту;

$t_{\text{тепл } j}$ – час, який заданий поїзд прямував з допоміжним локомотивом (на теплотязі з Козятина до Вінниці) – 6,87 год.;

$C_{\text{тепл}}$ – вартість однієї поїздогодини прямуювання поїзда теплотягою, за даними АТ УЗ за 2023 рік становить – 8197,34 грн./год.;

$t_{\text{дод}}$ – час прямуювання альтернативним маршрутом від місцезнаходження заданого швидкісного поїзда (ст. Фастів), до кінцевої станції (ст. Перемишль) – 13,08 год.;

$t_{\text{норм.}}$ – час прямуювання заданого швидкісного поїзда графіковим маршрутом від місцезнаходження(ст. Фастів), до кінцевої станції (ст. Перемишль) – 6,25 год.

Таким чином, загальні витрати до впровадження технології становитимуть:

Де, $C_{орг\ ел}$ – разові організаційні витрати на використання електровоза для додаткового «поїзду-шаттлу», для даного випадку становлять - 4500 грн;

$t_{ел\ i}$ – час, який заданий поїзд (УЗШК) прямував альтернативним маршрутом на електротязі, з Фастова до Перемишля – 5,27 год.;

e – кількість станцій з посадкою/висадкою пасажирів через які проходить маршрут «поїзда-шаттлу», в нашому випадку це Хмельницький та Тернопіль, тому ($e = 2$)

P_{max} – кількість пасажирів, яку необхідно підвезти «поїздом-шаттлом». Розраховується на основі прогнозування методом нейронних мереж сформованим у розділі 2 або задається по факту в залежності від оперативної обстановки. У розрахунках береться як максимальне значення між посадкою та висадкою пасажирів на певній графіковій зупинці. Для заданого випадку береться по станції Вінниця – 69 пасажирів, Хмельницький – 40, Тернопіль – 34.

Варто зазначити, що для «поїзда-шаттла» число 54 в знаменнику означає кількість місць в плацкартному вагоні, бо саме цей тип вагонів найбільш рентабельно використовувати, для автобусів, була взята середня кількість місць – 45.

$E_{пас}$ – вартість очікування пасажиром, подачі «поїзда-шаттла» або автобусу (враховуючи курс долара 40 грн) - 23,66 грн/год;

$C_{орг\ пк}$ – разові організаційні витрати на використання пасажирського вагону для додаткового «поїзда-шаттлу», грн. До них відносяться витрати на проведення маневрів, прямування до початкової станції «поїзда-шаттла», тощо. В заданому випадку становлять 1500 грн.;

k - кількість задіяних електрифікованих ділянок для «поїзда-шаттла», в нашому випадку ($k = 2$);

$t_{ел\ k}$ – час, який «поїзд-шаттл» прямував на електротязі з Хмельницького до Красного – 2,27 год.;

u – кількість станцій з посадкою/висадкою пасажирів через які має пройти автобусний маршрут. В заданому випадку це лише станція Вінниця, тому $u = 1$

l - кількість ділянок на яких був застосований автомобільний транспорт, (Вінниця-Козятин, $l = 2$);

$C_{\text{орг. авт}}$ – разові організаційні витрати на використання автомобільного транспорту, до яких входить прямування до вокзалу станції Вінниця та назад після підвозу необхідної кількості пасажирів, простій в очікуванні пасажирів, тощо – 3000 грн;

$t_{\text{авт 1}}$ – час прямування автомобільним транспортом з Вінниці до Козятина – 0,7 год.;

$C_{\text{авт}}$ – вартість однієї години використання автобуса, взято за даними 1000 грн./год.;

Двійка перед знаком суми при обчисленні витрат на залучення «поїзда-шаттлу» та автомобільного транспорту, допомагає розрахувати вартість в прямому та зворотному напрямках.

$t_{\text{дод}}$ – час прямування альтернативним маршрутом від місцезнаходження заданого швидкісного поїзда (ст. Фастів), до кінцевої станції (ст. Перемишль) – 5,27 год.;

$t_{\text{норм.}}$ – час прямування заданого швидкісного поїзда графіковим маршрутом від місцезнаходження (ст. Фастів), до кінцевої станції (ст. Перемишль) – 6,25 год.

Як бачимо, $t_{\text{дод}} < t_{\text{норм.}}$, це означає, що альтернативний маршрут займе менше часу ніж графіковий, тому поїзду 715 прийдеться очікувати по станції Красне, щоб далі рухатись діючим розкладом. Звідси випливає, що $t_{\text{дод}} - t_{\text{норм}}$ можна прирівняти до нуля.

Таким чином, величина загальних витрат для надання альтернативного маршруту, після впровадження запропонованої технології надання альтернативних маршрутів із залученням «поїзда-шаттлу» та автомобільного транспорту, як показано на рисунку 4.7 становитиме:

$$E_{T2} = 7517,45 * 5.27 + 4500 + \left[\frac{34+40*23,66}{54} \right] * 1500 + 2 * 2,27 * 7517,45 + \left[\frac{69}{45} \right] * (3000 + 2 * 1000 * 0,7) + 3040,88 * 0 = 90046,18 \text{ грн.}$$

У випадку, коли немає можливості залучити автомобільний транспорт, використовуючи створено технологію, можливо обмежитись використанням лише

«поїзда-шаттлу» зі станції Вінниця до станції Красне, а прямування заданого швидкісного поїзда можливе також через Козятин-Шепетівку-Здолбунів-Красне (рис. 4.8).

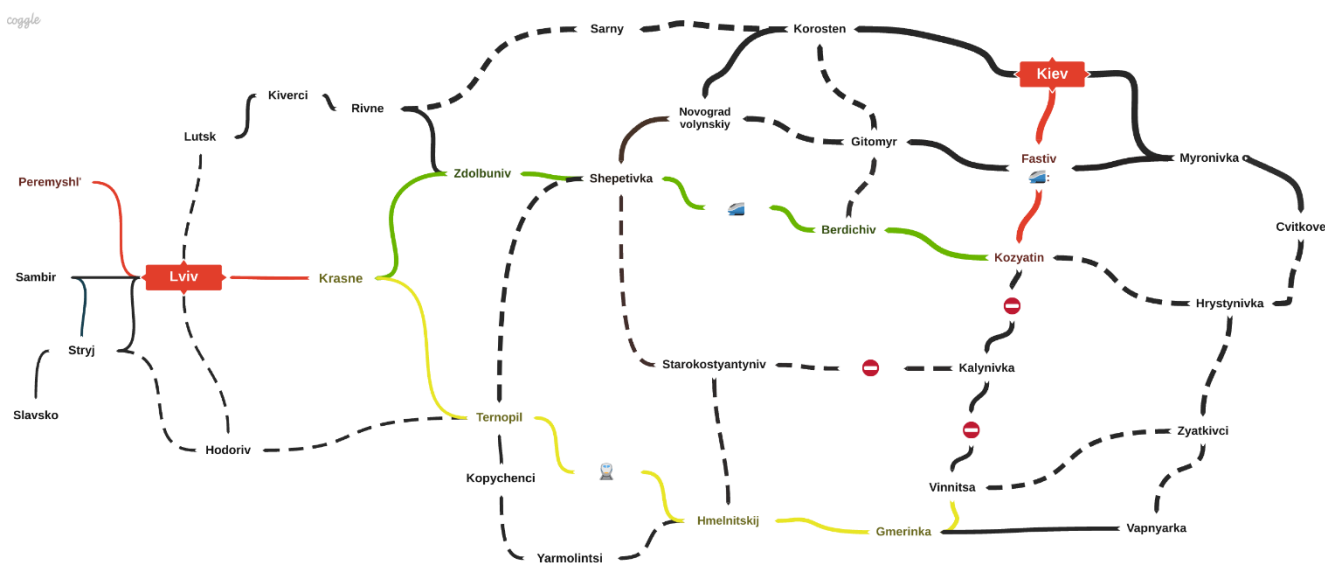


Рисунок 4.8 Схема альтернативного маршруту для поїзда 715 із залученням лише «поїзда-шаттла»

В цьому випадку, формула для обчислення загальних витрат буде набувати наступного вигляду:

$$\begin{aligned}
 E_{ТЗ} = & \sum_{i=1}^7 C_{ел} * t_{ел i} + C_{орг_{ел}} + \left[\frac{\sum_{e=1}^3 P_{max} * E_{пас}}{54} \right] C_{орг.пк} + \\
 & + 2 * \sum_{k=1}^4 C_{ел} * t_{ел k} + C_{пр}(t_{дод} - t_{норм})
 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Де, e – кількість станцій з посадкою/висадкою пасажирів через які проходить маршрут «поїзда-шаттлу», тепер це Вінниця, Хмельницький та Тернопіль, тому ($e = 3$);

k - кількість задіяних електрифікованих ділянок для «поїзда-шаттла», ($k = 4$)

$t_{ел k}$ – час, який «поїзд-шаттл» прямував на електротязі з Вінниці до Красного – 3,89 год.;

Загальні витрати тоді становитимуть:

$$E_{\text{тз}} = 7517,45 * 5.27 + 4500 + \left[\frac{(34+40+69)*23,66}{54} \right] * 1500 + 2 * 3,89 * 7517,45 + 3040,88 * 0 = 107102,72 \text{ грн}$$

Враховуючи, що вартість поїздо-години при електротязі дорівнює 7517,45 грн., а час графікового прямування поїзду 715 із Фастова до Перемишля становить 6,25 год., перемноживши ці два значення, отримуємо експлуатаційні витрати при графіковому прямуванні, що становлять 46984,06 грн. Подальші обчислення можливих додаткових витрат на майбутні 5 років було наведено в Додатку П.

Таким чином, додаткові витрати на формування альтернативного маршруту поїзда 715 до впровадження запропонованої технології становлять 273856,26 грн. Після впровадження запропонованої технології з використанням автомобільного транспорту та «поїзда-шаттлу» ці витрати скоротилися до 146411,21 грн., а у випадку коли залучений лише «поїзд-шаттл» - до 204303,45 грн.

Економічний ефект при цьому за 5 років, становитиме 127445,05 грн., при використанні «поїзда-шаттлу» та автомобільного транспорту, та 69552,81 грн. при залучені лише «поїзда-шаттлу»

Зазначений економічний ефект отриманий лише для одного поїзду, одного дня та одного пошкодження залізничної інфраструктури при прямуванні в одному напрямку. Тому, для розрахування сумарного економічного ефекту від впровадження запропонованої автоматизованої технології надання альтернативних маршрутів, автором було взято до уваги, що на заданій ділянці курсують 2 пари поїздів категорії Intercity+ за добу. Також, оскільки запропонована технологія може бути адаптована і під звичайні пасажирські чи швидкі поїзди (кількість яких на заданій ділянці складає 14 пар), то при розрахунках сумарного економічного ефекту їх також було взято до уваги. А кількість діб, за рік, під час яких ділянка може бути закритою через руйнування чи плановий ремонт для мирного часу, було встановлено на основі динаміки наведеної на рисунку 1.11– 2-3 доби. Саму ж технологію надання

альтернативних маршрутів для пасажирських поїздів рекомендовано впроваджувати на регіональному рівні в межах регіональних філій «Львівська залізниця» та «Південно-західна залізниця», оскільки саме в їх межах відбувається найбільш інтенсивний пасажирський рух. Разові витрати на впровадження запропонованої технології, при цьому становитимуть близько 2 млн грн. Таким чином, при залучені «поїзда-шаттлу» та автомобільного транспорту, загальний економічний ефект становитиме:

$$\Delta E = 127445,05 \cdot (2+14) \cdot 2 \cdot 3 - 5000000 = 11312966,4 \text{ грн.} \quad (4.7)$$

При залучені лише «поїзда-шаттла»:

$$\Delta E = 69552,81 \cdot (2+14) \cdot 2 \cdot 3 - 5000000 = 3902759,68 \text{ грн}$$

Відповідно, в період військового стану, пошкодження залізничної інфраструктури може відбуватися частіше, а значить величина економічного ефекту буде вище.

4.4 Висновки до четвертого розділу

1. Визначено, що оперативне управління на мережі українських залізниць є критично важливим компонентом для забезпечення ефективності та безпеки перевезень. Воно охоплює широкий спектр функцій, починаючи від планування розкладів руху поїздів до управління ризиками, що виникають у процесі перевезення. Основні завдання оперативного управління включають створення оптимальних маршрутів, моніторинг стану рухомого складу, контроль за виконанням графіків та швидко реакцію на непередбачувані обставини.

Диспетчерські центри і служби роботи станцій відіграють ключову роль у забезпеченні безперервності перевезень і задоволення потреб пасажирів та вантажовласників. Зокрема, у випадках надзвичайних ситуацій важливою є здатність швидко формувати альтернативні маршрути, що дозволяє мінімізувати затримки і зберігати безпеку руху.

Інтеграція управління ризиками в оперативне управління є невід'ємною частиною для підтримки економічної ефективності та стабільності залізничних перевезень. В умовах змінюваного середовища, яке може включати природні катастрофи або техногенні аварії, адаптивність та активний підхід до управління ризиками допомагають забезпечити безпеку пасажирів і зменшити експлуатаційні витрати.

2. Формування системи оперативного управління швидкісними залізничними пасажирськими перевезеннями в умовах пошкодження інфраструктури є критично важливим для забезпечення безпеки і ефективності перевезень. Аналіз існуючих процедур взаємодії між працівниками залізниці продемонстрував, що складність і тривалість процесу реагування на надзвичайні ситуації, що безпосередньо впливає на час простою поїздів і, відповідно, на витрати.

Запропонована автоматизована технологія надання альтернативних маршрутів значно спростить цей процес, зменшуючи кількість залучених працівників та час, необхідний для прийняття рішень. Автоматизація дозволить оперативно обробляти інформацію про пошкодження, швидше узгоджувати маршрути і, як результат, знизити економічні втрати, пов'язані з затримками.

Впровадження нової системи не лише підвищить ефективність управління, але й зменшить ймовірність помилок, які можуть виникнути під час ручного управління. Це створить можливості для більш швидкої і гнучкої реакції на надзвичайні ситуації, що в свою чергу сприятиме підвищенню надійності залізничних перевезень.

3. Встановлено, що впровадження автоматизованої технології надання альтернативних маршрутів для залізничного транспорту є стратегічно важливим кроком у забезпеченні надійності і безперервності пасажирських перевезень. З огляду на загрози, пов'язані з пошкодження інфраструктури, а також необхідність швидкого реагування на випадки аварій та планових ремонтів, нова технологія дозволяє значно скоротити витрати та зберегти час подорожі.

Аналіз на прикладі швидкісного поїзда №715 Київ—Львів показав, що завдяки впровадженню альтернативних маршрутів витрати на експлуатацію можуть бути суттєво зменшені. Зокрема, загальні витрати без технології становили 127530,02 грн,

тоді як після її впровадження з використанням автомобільного транспорту та «поїзда-шаттла» вони зменшились до 90046,18 грн, а лише з «поїздом-шаттлом» — до 107102,72 грн.

Загальний економічний ефект від реалізації технології, лише при одному пошкодження або плановому ремонті на рік, за п'ять років може становити 127445,05 грн при використанні «поїзда-шаттла» та автомобільного транспорту, і 69552,81 грн — лише з «поїздом-шаттлом». Враховуючи загальний обсяг перевезень, можливий економічний ефект може досягти 11,3 млн грн або 3,9 млн грн залежно від моделі використання альтернативного маршруту. А для періоду військового стану, оскільки пошкодження залізничної інфраструктури може відбуватися набагато частіше - величина економічного ефекту буде також значно вищу вище.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено наукове завдання – удосконалення організації пасажирських перевезень в умовах пошкодження залізничної інфраструктури із можливим задіянням додаткових «поїздів-шаттлів» та автомобільного транспорту. В результаті отримано наступні висновки:

1. Проаналізовано стан та розвиток залізничних пасажирських перевезень в Україні та було визначено, що на сьогоднішній день, пасажирські перевезення в Україні забезпечуються лише автомобільним та залізничним транспортом. Аналіз динаміки основних показників поїздів категорії Intercity, а також дальнього та регіонального сполучення показав, що кількість перевезених пасажирів під час військового стану скоротилася порівняно з попередніми роками, але залишалася на досить високому рівні, а також досягла рекордних показників у напрямку до країн ЄС. Згідно з графічними аналізами, зміни в пасажиропотоці та рівні населеності пасажирських поїздів були відзначені, проте залізниця зуміла адаптуватися та відновити певну стабільність до кінця звітної періоду. Це свідчить про високий рівень організаційної та технічної підготовленості залізничного транспорту України навіть у надзвичайних умовах.

2. Проаналізовано динаміку основних показників роботи поїздів категорій Intercity+, дальнього та регіонального сполучення, який показав, що кількість перевезених пасажирів під час дії військового стану скоротилася порівняно з довоєнними роками, проте залишалася на досить високому рівні. Окремо варто відзначити досягнення рекордних обсягів перевезень у напрямку країн Європейського Союзу. Згідно з результатами графічного аналізу, були зафіксовані зміни у структурі пасажиропотоків та рівні населеності поїздів, однак залізничний транспорт України зміг оперативно адаптуватися до нових умов і відновити певну стабільність до кінця звітної періоду. Це свідчить про високий рівень організаційної та технічної готовності залізничної галузі навіть в умовах надзвичайних ситуацій.

3. Проведений аналіз причин пошкодження залізничної інфраструктури засвідчив, що кожна з них має специфічний характер впливу на стабільність

перевізного процесу. Виявлено, що основними чинниками пошкоджень є природні катаклізми, транспортні події та військові дії, кожен із яких має власні особливості виникнення та масштаби наслідків. Особливу загрозу для залізничної мережі в сучасних умовах становлять бойові дії, які відповідно до проведеного відсоткового аналізу є причиною понад 53% усіх випадків пошкодження інфраструктури. Отримані результати показали, що при плануванні та організації пасажирських перевезень необхідно також враховувати ризики пошкодження інфраструктури.

4. Зважаючи на високу точність, здатність автоматично виявляти ознаки, ефективну роботу з великими обсягами даних, гнучкість і можливість тестування сценаріїв, найбільш підходящим методом для прогнозування пасажиропотоків у сучасному складному і динамічному середовищі було обрано метод нейронних мереж. Інші методи, хоч і можуть бути корисними в певних контекстах, але не можуть забезпечити такого рівня деталізації і адаптивності, як нейронні мережі.

Аналіз пасажиропотоків за 2022 рік показав, що найбільш затребуваним напрямком став Львівський, що пов'язано з евакуацією населення через бойові дії. Швидкісні поїзди Intercity+ залишаються найбільш привабливими для пасажирів завдяки меншому часу в дорозі, вищому рівню комфорту та надійності перевезень, що є особливо важливим для ділових подорожей і туристичних поїздок. Модель прогнозування пасажиропотоків для поїздів цієї категорії було побудовано на прикладі посадки та висадки пасажирів по ст. Вінниця поїзда №715 сполученням Київ–Перемишль, який виявився найпопулярнішим серед пасажирів.

У результаті проведеного дослідження було розроблено ефективну модель прогнозування кількості пасажирів, що здійснюють посадку та висадку на графікових зупинках пасажирських поїздів. Для розв'язання поставленого завдання обґрунтовано використання нейронної мережі типу Feedforward Neural Network (FFNN), навчання якої здійснювалося за допомогою алгоритму Levenberg–Marquardt (trainlm). Вхід до моделі формувався на основі впливових динамічних факторів, зокрема сезонності перевезень та ефекту вихідного дня, а також значень пасажиропотоку за попередні дні. В процесі моделювання було визначено оптимальну архітектуру мережі (2

приховані шари по 8 нейронів), що забезпечила високу точність прогнозування з похибкою не більше 6%.

1. У межах проведеного дослідження розроблено комплексний метод оцінки ризику затримки пасажирських поїздів, який враховує імовірнісні характеристики виникнення пошкоджень залізничної інфраструктури під дією різних факторів ризику. Встановлено, що основними причинами пошкоджень є природні катаклізми, транспортні події та бойові дії. Для кожного фактора окремо розраховано індивідуальні ймовірності пошкодження залізничних ділянок, а також запропоновано механізм їх динамічного об'єднання в загальну ймовірність із урахуванням змін у структурі пошкоджень у часі.

Розроблена модель динамічного оновлення ваг дозволяє адаптивно реагувати на зміни зовнішніх умов, підвищуючи достовірність прогнозування потенційних загроз для залізничної мережі. Визначено, що ризик затримки пасажирських поїздів розраховується як добуток сумарної ймовірності пошкодження та математичного очікування величини затримки, що апроксимується нормальним законом розподілу за статистичними даними.

Отриманий ризик затримки інтегрується у розрахунок загального прогнозованого часу прямування пасажирського поїзда на альтернативних маршрутах. Застосування запропонованого методу дозволяє забезпечити точніше планування пасажирських перевезень, оперативніше реагувати на пошкодження інфраструктури та приймати обґрунтовані управлінські рішення в умовах надзвичайних ситуацій.

4. Застосовано теорію графів для моделювання та аналізу залізничних мереж, що є надзвичайно ефективним інструментом, який дозволяє оптимізувати транспортні операції. Обраний напрямок Київ-Львів був представлений у вигляді зваженого графу, де вершини представляють основні залізничні станції, а ребра – залізничні ділянки з вагою у вигляді часу на подолання кожної ділянки, наявності електрифікації та пропускної спроможності. Така модель дозволяє більш точно оцінювати час прямування поїздів і експлуатаційні витрати, що є важливим для формування альтернативних маршрутів. Застосування «поїздів-шаттлів» та

автомобільного транспорту для підвозу пасажирів у випадку пошкодження інфраструктури або проведення ремонтних робіт забезпечує гнучкість і ефективність транспортної системи, а також дає можливість швидко реагувати на непередбачувані ситуації та підтримувати високий рівень обслуговування пасажирів.

Встановлено, що формування альтернативних маршрутів у разі пошкодження залізничної інфраструктури є критично важливою задачею, яка забезпечує безперервність перевезень, мінімізацію економічних і соціальних втрат, а також підвищення рівня довіри пасажирів до залізничного транспорту. Запропонована оптимізаційна математична модель з цільовою функцією мінімізації підвищення експлуатаційних витрат (порівняно зі штатними витратами) дозволяє ефективно вирішувати цю задачу.

Модель враховує витрати на прямування альтернативним маршрутом, використання «поїздів-шаттлів» та автомобільного транспорту, а також додаткові простої поїздів. Введення булевих змінних та інших параметрів у цільову функцію дозволяє гнучко моделювати різні сценарії та умови перевезень, забезпечуючи точність і надійність результатів.

Завдяки використанню даної математичної моделі можна оперативно визначати оптимальні альтернативні маршрути у випадку надзвичайних ситуацій, що дозволяє мінімізувати час простою, зменшити експлуатаційні витрати та забезпечити своєчасне прибуття пасажирів до місця призначення. Це сприяє підвищенню ефективності управління залізничною мережею, забезпеченню її надійності та адаптивності до непередбачуваних умов, що є критично важливим для стійкості транспортної системи в цілому.

5. Продемонстровано процес створення моделі формування альтернативних маршрутів для пасажирського поїзда №715 сполученням Київ-Перемишль. Розроблена модель враховує такі фактори, як наявність електрифікації, пропускна спроможність ділянок, види транспорту, оперативна інформація щодо стану інфраструктури та багато інших параметрів. Також, було встановлено, що для пошуку оптимального рішення найбільш доцільне використання апарату генетичних алгоритмів. Важливою особливістю запропонованої моделі є можливість адаптації до

різних умов і обмежень, що дозволяє швидко реагувати на непередбачені обставини та забезпечувати безперервність пасажирських перевезень.

Під час тестування моделі були розглянуті різні сценарії пошкодження інфраструктури, і було показано, як система пропонує альтернативні маршрути з використанням різних видів рухомого складу (тепловозів, «поїздів-шаттлів», автобусів). Застосування таких маршрутів забезпечує збереження високого рівня обслуговування пасажирів, знижуючи ризики виникнення затримок та можливих інших незручностей для пасажирів.

Впровадження розробленої технології було створено у вигляді програмного продукту для автоматизованих робочих місць оперативного персоналу у вигляді системи підтримки прийняття рішень (СППР), яка дозволить значно підвищити рівень надійності залізничних пасажирських перевезень та, в свою чергу, сприятиме підвищенню конкурентоспроможності залізничного транспорту в загальній транспортній системі України.

Проведено апробацію запропонованої системи, яка показала, час на прийняття рішення при використанні запропонованої технології зменшується на величину від 60% до 75%. Така різниця лише підтверджує корисність запропонованої технології. Також, було встановлено, що зі збільшенням складності ситуації, зменшується вірогідність прийняття правильного (оптимального) рішення. У відсотковому еквіваленті дана різниця становить від 0% до 45%

6. Визначено, що оперативне управління на мережі українських залізниць є критично важливим компонентом для забезпечення ефективності та безпеки перевезень. Воно охоплює широкий спектр функцій, починаючи від планування розкладів руху поїздів до управління ризиками, що виникають у процесі перевезення. Основні завдання оперативного управління включають створення оптимальних маршрутів, моніторинг стану рухомого складу, контроль за виконанням графіків та швидко реакцію на непередбачувані обставини.

Формування системи оперативного управління швидкісними залізничними пасажирськими перевезеннями в умовах пошкодження інфраструктури є критично важливим для забезпечення безпеки і ефективності перевезень. Аналіз існуючих

процедур взаємодії між працівниками залізниці продемонстрував, що складність і тривалість процесу реагування на надзвичайні ситуації, що безпосередньо впливає на час простою поїздів і, відповідно, на витрати.

Запропонована автоматизована технологія надання альтернативних маршрутів значно спростить цей процес, зменшуючи кількість залучених працівників та час, необхідний для прийняття рішень. Автоматизація дозволить оперативно обробляти інформацію про пошкодження, швидше узгоджувати маршрути і, як результат, знизити економічні втрати, пов'язані з затримками.

Впровадження нової системи не лише підвищить ефективність управління, але й зменшить ймовірність помилок, які можуть виникнути під час ручного управління. Це створить можливості для більш швидкої і гнучкої реакції на надзвичайні ситуації, що в свою чергу сприятиме підвищенню надійності залізничних перевезень.

7. Встановлено, що впровадження автоматизованої технології надання альтернативних маршрутів для залізничного транспорту є стратегічно важливим кроком у забезпеченні надійності і безперервності пасажирських перевезень. З огляду на загрози, пов'язані з пошкодженням інфраструктури, а також необхідність швидкого реагування на випадки аварій та планових ремонтів, нова технологія дозволяє значно скоротити витрати та зберегти час подорожі.

Загальний економічний ефект від реалізації технології, лише при одному пошкодженні або плановому ремонті на рік, за п'ять років може становити 127445,05 грн при використанні «поїзда-шаттла» та автомобільного транспорту, і 69552,81 грн – лише з «поїздом-шаттлом». Враховуючи загальний обсяг перевезень, можливий економічний ефект може досягти 11,3 млн грн або 3,9 млн грн залежно від моделі використання альтернативного маршруту. А для періоду військового стану, оскільки пошкодження залізничної інфраструктури може відбуватися набагато частіше - величина економічного ефекту буде також значно вище.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бутько Т. В., Примаченко Г. О., Тарасов К. О. Удосконалення існуючих методів організації пасажирських залізничних перевезень з урахуванням можливих ризиків руйнування залізничної інфраструктури. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2022. Т. 27, № 3. С. 3–9.
URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v27i3.265527>
2. Примаченко Г.О., Шкурченко О.В., Будник В.А., Корнійко Я.Р., Тарасов К.О. Удосконалення технології мультимодальних пасажирських перевезень в умовах воєнного стану в Україні. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*, 2023. № 100. С. 120.
URL: <https://doi.org/10.30977/bul.2219-5548.2023.100.0.120>
3. Бутько Т.В., Пархоменко Л. О., Тарасов К.О., Гайдук Д.А. Формалізація процедури надання альтернативного маршруту швидкісним пасажирським поїздам на основі ризик-менеджменту. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. Т. 28, № 1. С. 31–37.
URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i1.276341>
4. Тарасов К.О. Удосконалення чинної системи оперативного управління швидкісними залізничними пасажирськими перевезеннями *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. Т. 29, № 3. С. 33–40.
URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i3.313607>
5. Butko T., Prymachenko H., Kovalov A., Tarasov K., Kolisnyk A. Research on the Issue of Prognosticationing the Volume of Passenger Traffic on Railway Transport in Meanrn Conditions. *Review of Economics and Finance*. 2023. Vol. 21. P. 236–245.
URL: <https://doi.org/10.55365/1923.x2023.21.22> (Scopus)
6. Butko T., Primachenko H., Tarasov K. Formation of alternative routes for passenger trains in the event of non-standard situations. *MATEC Web of Conferences*. 2024. Vol. 390. P. 03003. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/202439003003> (Web of Science)

7. Примаченко Г.О., Тарасов К.О., Григорова Є.І. Удосконалення логістичного управління при перевезенні пасажирів. *Інформаційно - керуючі системи на залізничному транспорті*: тези стендових доповідей та виступів учасників 34-ї міжнародної науково-практичної конференції. Харків: УкрДУЗТ, 2021. - №3 (Додаток). – С. 15. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2021/10/34-mnpk_2021.pdf

8. Примаченко Г.О., Тарасов К.О. Дослідження технології визначення прогностної оцінки пасажирообігу на залізничному транспорті. *Нові інформаційні технології управління бізнесом*: тези V Всеукраїнської науково-практичної конференції. (Київ, 16 лютого 2022 р.). – Київ: Спілка автоматизаторів бізнесу, 2022. С. 238-241. URL: [http://www.unionba.com.ua/seminars/v-vseukrayinska-naukovo-practicna-konferenciya](http://www.unionba.com.ua/seminars/v-vseukrayinska-naukovo-prakticna-konferenciya)

9. Примаченко Г.О., Тарасов К.О., Григорова Є.І. Підвищення надійності транспортних систем на основі удосконалення організаційно-технологічної структури проектів мультимодальних перевезень. *Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем*: матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції (Кропивницький, 13-15 квітня 2022 р). Кропивницький : ЦНТУ, 2022. С. 108-110. URL: <http://erm.kntu.kr.ua/KONFERENSIIA.html>

10. Prymachenko H.O., Tarasov K.O. Organization of rail transportation in martial law conditions. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика*: матеріали вісімнадцятої науково - практичної міжнародної конференції (Харків, 2 – 3 червня 2022 р.) Харків: УкрДУЗТ, 2022. С 178-180.

11. Примаченко Г.О., Тарасов К.О., Григорова Є.І., Карпенко Н.А. Сучасний стан логістики вантажних перевезень в Україні. *Інтелектуальні транспортні технології*: тези 3-ї міжнародної науково-технічної конференції (Харків, 22 – 23 листопада 2022 р.) Харків: УкрДУЗТ, 2022. С 145-147.

12. Примаченко Г.О., Тарасов К.О., Григорова Є.І. Удосконалення процесу міжнародних залізничних перевезень в Україні. *Інформаційно- керуючі системи на*

залізничному транспорті: тези стендових доповідей та виступів учасників 35-ї міжнародної науково-практичної конференції. (Харків, 11 листопада 2022 р.) Харків: УкрДУЗТ, 2022. №3 (Додаток). С. 19-20. URL: <https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2022/11/tezi-3dodatok-2022.pdf>

13. Примаченко Г.О., Тарасов К.О. Удосконалення процесу організації пасажирських залізничних перевезень при виникненні нестандартних ситуацій. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика*: тези дев'ятнадцятої науково - практичної міжнародної конференції (Харків, 1-2 червня 2023 р.) Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 168-170.

14. Butko T., Primachenko H., Tarasov K. Formation of alternative routes for passenger trains in the event of non-standard situations. *Energy-optimal technologies, logistics and safety on transport: materials of the 3-nd International Scientific and Practical Conference* (Lviv, 9–10 November 2023) Lviv Polytechnic Publishing House. 2023 P. 58-59

15. Примаченко Г.О., Тарасов К.О., Родін Р.Д. Удосконалення організації руху регіональних поїздів за допомогою адаптивного метаверстичного підходу *Інтелектуальні транспортні технології*: тези 4-ї міжнародної науково-технічної конференції (Харків, 27 – 28 листопада 2023 р.) Харків: УкрДУЗТ, 2023. С 204-205. URL: <https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2023/11/zbirnik-tez-dopovidej-itt2023-1.pdf>

16. Примаченко Г.О., Тарасов К.О. Організація пасажиропотоків за умови еластичного попиту. *Прикладні науково-технічні дослідження*: матеріали VI міжнародної науково-практичної. конференції. (Івано-Франківськ, 14-16 травня 2024 р.) Академія технічних наук України. – Івано-Франківськ : Видавець Кушнір Г. М. – 2024. – С. 211-212. URL: <https://ukrtsa.org.ua/wp-content/uploads/2024/05/conf2024.pdf>

17. Примаченко Г.О., Тарасов К.О. Формування альтернативних маршрутів для пасажирських поїздів на основі генетичних алгоритмів. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика*: тези двадцятої

науково - практичної міжнародної конференції. (Харків, 6-7 червня 2023 р.) Харків: УкрДУЗТ, 2024. С. 164-165.

18. Тарасов К. О. Формування альтернативних маршрутів пасажирських поїздів за допомогою апарату генетичних алгоритмів. *Транспортні технології в сучасних умовах*: колект. монографія. Івано-Франківськ, 2024. Т. 1. С. 111–143. URL: <https://doi.org/DOI:10.63048/978-617-7926-64-0.4>.

19. Інформація про українські залізниці. Міністерство інфраструктури України. URL: <https://mtu.gov.ua/content/informaciya-pro-ukrainski-zaliznici.html> (дата звернення: 1.05.2022).

20. Петренко О. О. Пасажирські залізничні перевезення в Україні: сучасний стан і перспективи розвитку. *Економіка та управління національним господарством*. 2016. Вип. 10. С. 47-52. URL: <http://bses.in.ua/journals/2016/10-2016/11.pdf> (дата звернення: 11.04.2022).

21. Дмитрієв М. М., Мороз М. М. Основні напрями вдосконалення міських пасажирських перевезень м. Кременчук. *Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія*. 2012. Вип. 10. – С. 58-63.

22. Вакарчук І. М., Корітчук С. О. Удосконалення пасажирських перевезень при взаємодії видів транспорту. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2017. Вип. 102. С.193-203. Режим доступу: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/102/193-203.pdf. (дата звернення: 11.04.2022).

23. Дейнека О. Г., Реброва А. Ю., Булкіна О. О. Удосконалення механізму транспортної логістики в умовах реформування залізничного транспорту. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2012. № 128. С. 118–122.

24. Вакуленко К. Є., Соколова Н. А., Шилле Н. В. Адаптація принципів міської логістики до організації пасажирських перевезень. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*. 2017. №. 134. С. 113-121.

25. Єлагін, Ю. В. Обруч Г. В. Перспективи розвитку транспортної логістики на підприємствах залізничного транспорту *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2014. Вип. 48. С. 121-123.

26. Гриценко Н. В. Удосконалення стратегічного управління підприємств залізничного транспорту України. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2012. Вип. 38. С. 116-117.

27. Волохов В.А., Волохова І.В., Чебанова О.П. Удосконалення логістичних систем залізничного транспорту. *Тези доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Маркетинг та логістика в системі менеджменту»*. Львів: Національний унів-т «Львівська політехніка», 2020. С. 31

28. Бутько Т. В., Бауліна Г. С., Верьовко В. М. Удосконалення технології роботи прикордонної перевантажувальної станції на основі вимог логістики. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2012. №. 128. С. 26-31.

29. Дикань В. Л., Єлагін Ю. В. Інформаційні технології підвищення ефективності пасажирських перевезень. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2015. Вип. 52. С. 107-110.

30. Ломотько Д. В., Красноштан О. М., Філіпський О. В., Ломотько М. Д. Удосконалення технології мультимодальних залізничних пасажирських перевезень за участю автотранспорту. *Залізничний транспорт України*. 2019. Вип. 2. С. 4-16.

31 Карась О. Класифікація ризиків залізничного транспорту. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Сер. : Економіка і управління*. 2014. Вип. 29. С. 95-103. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpdetut_eiu_2014_29_15.

32. Грінченко Є. М., Соколов Д. Л., Федоренко Р. М., Грінченко Є. М., Оцінка аварійного ризику при русі поїздів з нафтопродуктами за конкретним маршрутом *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2013. Вип. 18. С. 42-47. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pns_2013_18_8.

33. Кульова Д. О. Кравець А. Л., Ризик-орієнтовані технології перевезень: *конспект лекцій. Частина I*. Харків : УкрДУЗТ, 2023. 70 с.

34. Журавель, К. В. Удосконалення методів оцінки та управління господарським ризиком підприємства залізничного транспорту : автореф. дис. ... канд. екон. наук : 08.00.04 Харків, 2010. - 22 с.

35. Бутько Т. В. Прохоров В. М., Чехунов Д. М. Формалізація технології переробки вагонопотоків із небезпечними вантажами на сортувальній станції на основі експозиції ризику. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. Вип 2. С. 18-22. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ikszt_2018_2_4.

36. Воловельська І. В., Гайдуков Б. Становлення системи управління ризиками в Україні. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2023. № 81-82. С. 123–128. URL: <https://doi.org/10.18664/btie.81-82.287237>

37. Бутько Т. В., Thierry Horsin, Ящук Ю. І Організація подорожей пасажирів на основі технологій ризик-менеджменту з використанням краудсорсингових даних про трафік. *Інтелектуальні транспортні технології : тези доповідей 3-ї міжнар. наук.-техн. конф.* (22-23 листопада 2022 р.). Харків. 2022. - С. 14-15.

38. Бутько Т. В. Константинов Д. В., Деревянко Т. О. Моделювання системи оперативного прогнозування пасажиропотоків в приміському сполученні на основі використання інтелектуальних технологій. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2009. Vol. 1, № 3(37). С. 43-47.

39. Прохорченко, А. В., Кулакова, М. В., Юсіфов, С. В. (2013) Удосконалення системи прогнозування пасажиропотоків на основі нейро-нечіткого моделювання, *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, Вип.135.С. 80-84.

40. Халіпова Н. В. Леснікова І. Ю., Прогонюк І. В., Соколова О. О. Імітаційне моделювання та прогнозування пасажиропотоків в аеропортах України. *Системи та технології*. 2016. Вип. 1. С. 153–169

41. Левтеров, А. І., Козачок, Л. М. , Левтеров А. І. Аналіз та моделювання освоєння пасажиропотоків на маршрутах громадського транспорту транспортних систем міст. *Моделювання та інформаційні технології в науці, техніці, кібербезпеці*

та освіти : матеріали Всеукр. наук.-практ. Internet-конф. 15–16 листоп. 2022 р., м. Харків, 2022. – С. 47–51.

42. Резуненко М. Балака Є., Вдовиченко В. Прогнозування транспортного обслуговування населення в дальньому і міжміському сполученнях. *Прикладні науково-технічні дослідження* : матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції (5-7 квітня 2021 р.) – Івано-Франківськ : Кушнір Г. М. – 2021. – С. 388-390..

43. Доля К., Доля О. Системне моделювання функціонування маршрутів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Том 35. Вип. 1 2024. Ч. 2 . С. 171–178.

44. Пархоменко Л. О. Прохоров В. М., Калашнікова Т. Ю., Галуцька А. О., Шешеня І. І., Розробка процедури формування схеми маршрутів поїздів для автоматизованої системи управління швидкісними пасажирськими перевезеннями. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. Т. 26. Вип. № 3. - С. 18-26.

45. Романенко С. М., Бережна Н. Г. Інтелектуальний транспорт в пасажирському аспекті: *матеріали III Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Напрями розвитку технологічних систем і логістики в АПВ»*, м. Харків, 22 квітня 2021 р.; Харків, ХНТУСГ, 2021. С. 58-60.

46. Аулін В. В., Гриньків А. В., Головатий А. О. Інтелектуальні транспортні системи як результат впровадження інноваційних ефективних технологій. *Підвищення надійності машин і обладнання*. матеріали міжнар. наук.-практ. конф., м. Кропивницький 15-17 квіт. 2020 р.,: С. 207.

47. Кузнєцов Д. Г. *Інтелектуальні транспортні системи при перевезенні залізничним транспортом* д-ра філософії: 08.02.03. Харків. 2023.302 с.

48. Ключев С. О., Кузнєцов Д. Г. Інтелектуальні транспортні системи при перевезенні залізничним транспортом. *Інтелектуальні транспортні технології* : IV міжнар. наук.-техн. конф. (27-28 листопада 2023 р.) : тези доповідей. - Харків : УкрДУЗТ, 2023. - С. 281-283.

49. Онищенко, В. В. (2023). *Інтелектуальні транспортні системи*. Стійкий розвиток транспортної системи. Харків : 2023. - С. 293-295.

50. Малахова О. А. Жиленко Х. О., Павленко О. С. Аналіз чинників, що впливають на попит на пасажирські перевезення залізничним транспортом *Інтелектуальні транспортні технології : IV міжнар. наук.-техн. конф.* (27-28 листопада 2023 р.) : тези доповідей. Харків :УкрДУЗТ, 2023. С. 36-38.

51. Кудзієв М. Овсянніков Д., Пархоменко Л. Удосконалення технології взаємодії залізничного транспорту з морським портом. *Інтелектуальні транспортні технології : IV міжнар. наук.-техн. конф.* (27-28 листопада 2023 р.) : тези доповідей. Харків : 2023. С. 63-64.

52. Лозан О. М. Удосконалення планування пасажирських перевезень в міжнародному сполученні на основі інтелектуальних технологій. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті* : тези стендових доповідей та виступів учасників 34-ї міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті" (Харків, 29 жовтня, 2021 р.). 2021. Т. 26 № 3 (додаток). С. 54.

53. Телепенько А. О. Рябоконь Є. О., Інтелектуальні технології в оптимізації транспортних процесів в Україні. *Інтелектуальні транспортні технології : IV міжнар. наук.-техн. конф.* (27-28 листопада 2023 р.) : тези доповідей. - Харків : УкрДУЗТ, 2023. - С. 129-130.

54. Жуков І.А., Мартинова О.П. Метод побудови паралельних структур для пошуку альтернативних маршрутів у комп'ютерних мережах. *Вісник НАУ* 2004. Вип. 1. С. 14-17.

55. Кулакова С.Ю., Калембет А.В., Подкопова Д.Є. Особливості формування логістичних витрат підприємств в умовах воєнного стану. *Фінансово-кредитні системи: перспективи розвитку*. 2023. № 1 (8). С. 22-29. Режим доступу: <https://doi.org/10.26565/2786-4995-2023-1-03>

56. Рева А. А. Метод поиска альтернативных маршрутов в сетях передачи данных. *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. 2014. Вип. № 1. С. 112–115. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2014_1_18.

57. Демчук І. А. Розроблення варіантів маршрутів громадського транспорту на основі транзакцій абонентів стільникового зв'язку. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2016. Вип. 4. С. 84-87. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvpi_2016_4_17..

58. Bovy P. H., Stern E. Route choice: Wayfinding in transport networks: Wayfinding in transport networks. – Springer Science & Business Media, 2012. – Т. 9.

59. Domagała W., Buckiūniene O. Alternative transport routes from Europe to Asia after the outbreak of war. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie*. Politechnika Śląska. – 2023. P. 22-35.

60. Cetinkaya V., Gidener N. G. Analysis of Turkey: The United Kingdom Intermodal Transport Routes From the Perspective of Shippers. *Transport and Logistics Planning and Optimization*. – IGI Global, 2023. – С. 104-124.

61. Wong, Woan Foong and Fuchs, Simon, Multimodal Transport Networks (October, 2022). FRB Atlanta Working Paper No. 2022-13, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4277194> or <http://dx.doi.org/10.29338/wp2022-13>

62. Petersen N. C., Rodrigues F., Pereira F. C. Multi-output bus travel time prediction with convolutional LSTM neural network . *Expert Systems with Applications*. 2019. Т. 120. С. 426-435.

63. Ganin A. A. et al. Resilience in intelligent transportation systems (ITS) *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2019. Т. 100. С. 318-329.

64. Abduljabbar R. et al. Applications of artificial intelligence in transport: An overview. *Sustainability*. 2019. Т. 11. №. 1. С. 189.

65. SteadieSeifi M. et al. Multimodal freight transportation planning: A literature review. *European journal of operational research*. Eindhoven. 2014. Т. 233. №. 1. P. 1-15.

66. Wong Y. Z., Hensher D. A., Mulley C. Emerging transport technologies and the modal efficiency framework: *A case for mobility as a service (MaaS)*. Stockholm 2018. P. 73-78

67. Budd L., Ison S. Responsible Transport: A post-COVID agenda for transport policy and practice . *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2020. Т. 6. P. 100-151.

68. Prymachenko, H. O., Shapatina, O. O., Pestremenko-Skrypka, O. S., Shevchenko, A. V., Halkevych, M. V. Improving the technology of product supply chain management in the context of the development of multimodal transportation systems in the European Union countries. *Available Online at EScience Press Journals International Journal of Agricultural Extension Int. J. Agr. Ext.* 2022. Special Issue (01). P. 15-27. DOI :<https://esciencepress.net/journals/index.php/IJAE/article/view/3866>

69. Альошинський, Є. С., Примаченко, Г. О., Гусев, В. А., Гулиев, Г. М. (2017). Інтеграція системи організації міжнародних перевозок по маршруту «Запад – Юг». *Журнал «Українська залізниця»*. №11-12 (53-54). С. 45-48.

70. Prymachenko, H. O., Kovalov, A. O., Shelekhan, H. I., Shuldiner, J. V., Hryhorova, Y. I. (2021). The research of work organization technology Ukrainian logistic operators on the e-commerce basis using railway transport on the direction Ukraine-Asia. *Journal of University of Zulia (Revista de la Universidad del Zulia)*, Year 12, Number 32, January- April 2021, dedicated to Agro Sciences, Engineering and Technology. P. 486-499 DOI: <http://dx.doi.org/10.46925//rdluz.32.28>

71. Балака Є. І., Резуненко М. Є., Резуненко С. О., Попов М. А. Прогнозування обсягів пасажирських перевезень в дальньому залізничному сполученні на основі багатофакторного аналізу. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2019. Вип. 185. С. 6-14.

72. Примаченко Г. О., Маслінков Р. О. Дослідження технології побудови ланцюгів постачання послуг пасажирам залізничного швидкісного транспорту. *Журнал «Українська залізниця»*. 2018. Вип. 7-8. С. 12-16.

73. Qin L., Li W., Li S. Effective passenger flow forecasting using STL and ESN based on two improvement strategies. *Neurocomputing*. 2019. № 356. P. 244-256.

74. Yang D., Chen, K., Yang M., Zhao X. Urban rail transit passenger flow forecast based on LSTM with enhanced long-term features, *IET Intelligent Transport Systems*, 2019. № 13. P. 1475-1482.

75. Lomotko D.V., Prymachenko, H. O., Hryhorova, Ye. I. The role of Ukrainian railway transport in modern logistic processes. *Науковий журнал «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту»*. Дніпро: Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2019. №5 (83). С. 43-51. DOI: <https://doi.org/10.15802/tsp2019>.

76. Ломотько Д. В., Примаченко Г.О. Методологічний підхід до формалізації процесу функціонування динамічних мультимодальних транспортних систем. *Науково-технічний журнал «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*. 2021. №1. С. 30-37. URL: <http://jiks.kart.edu.ua/article/view/229070>

77. Pedersen, T.J., Paganelli, P., Knoors, F. One Common Framework for Information and Communication Systems in Transport and Logistics. *DiSCwise project deliverable*. Brussels, 2010. P. 200.

78. Карпа, Д. М., Цмоць, І. Г., & Опотяк, Ю. В. (2018). Нейромережеві засоби прогнозування споживання енергоресурсів. *Науковий вісник НЛТУ України*. Вип.-28(5).-С. 140-146.

79. Статут залізниць України. К.: Транспорт України, 1998. 83 с.

80. Козаченко Д.М., Коробйова Р.Г., Левицький І.Ю., Лашков О.В. Експлуатаційна робота залізничних станцій: приклади та задачі. *ДІІТ ім. академіка Лазаряна*. Дніпропетровськ: ПФ «Стандарт-Сервіс». 2014. С.108. ISBN 978-966-97463-0-6.

81. Єлагін Ю.В. Сутність та роль інноваційно-логістичних підходів в підвищенні ефективності обслуговування пасажирів. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2013. Вип. 44. С. 44-46.

82. Волохова І.В., Волохов В.А., Барський В.І. Логістичне забезпечення глобального руху матеріальних потоків. *Вісник економіки транспорту і промисловості: збірник науково-практичних статей*. Харків: УкрДУЗТ, 2018. Вип. 64. С. 117-124

83. Л.О. Позднякова, О.Г. Дейнека. Економіка залізничного транспорту: Навч. Посібник. Жердев та ін. Харків: УкрДАЗТ, 2010. – 243 с.

84. Логістика на залізничному транспорті: навч. посібник. - УкрДУЗТ, 2018. 219 с.
85. Бутько Т. В., Бауліна Г. С. Удосконалення технології роботи прикордонних станцій на основі систем підтримки прийняття рішень з елементами штучного інтелекту. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2009. № 27. С. 46. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vetp_2009_27_55
86. Бутько Т. В., Прохорченко А. В., Журба О. О. Удосконалення технології роботи залізничного вокзалу на основі моделювання динаміки руху пасажиропотоків *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: тези доповідей 70 Міжнародної науково-практичної конференції*. Дніпропетровськ. 2010. С. 129.
87. Бутько, Т. В., Прохорченко А.В., Журба О. О. Моделювання розподілу пасажиропотоків по поїздам на основі колективного інтелекту. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2010. Vol. 2, № 4 (44). С. 44-47.
88. Бутько Т. В., Константинов Д. В. Удосконалення технології приміських пасажирських перевезень. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту* : тези доповідей 70 Міжнародної науково-практичної конференції (15.04.-16.04.2010 р.). Дніпропетровськ. 2010. С. 128-129.
89. Бойко Н. І., Михайлишин В. Ю. Ефективність застосування генетичних алгоритмів для пошуку оптимізованих рішень. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. Серія : Інформаційні системи та мережі. 2016. № 854. С. 249-257. -Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPICM_2016_854_25.
90. Погорілий С. Д., Білоус Р. В. Застосування паралельних версій генетичних алгоритмів в комп'ютерних мережах. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*, 2011, Вип.-14 –С. 135-138.
91. Ломотько Д.В., Ковальов Д.Д. Застосування генетичних алгоритмів на стадії планування змішаних перевезень у міжнародному сполученні. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2020, 193: 53-61.

92. Калініна І. В., Лісовиченко О. І. Використання генетичних алгоритмів в задачах оптимізації. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2015. Т. 1, № 26. С. 48–61.

93. Вернигора Р. В., Єльнікова Л.О. Перспективи створення адаптивної системи оперативного управління роботою локомотивів та локомотивних бригад. *Транспортные системы и технологии перевозок*. 2012. Вип. 4. С. 25-29.

94. Бутько Т.В. Формування моделі оперативного управління процесом просування вагонів з небезпечними вантажами в підсистемі “технічна станція–прилегла дільниця” на базі нечіткої ситуаційної мережі. *Науково-технічний журнал «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті»*. Харків. 2012. Вип.5 С. 13-16.

95. Про транспорт: Закон України від 10.11.1994 р. №233/94. Дата оновлення: 28.04.2023. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/232/94-%D0%B2%D1%80> (дата звернення 02.03.2024).

96. Про залізничний транспорт. Закон України від 04.07.1996 р. за №273/96. Дата оновлення: 19.12.2021. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/273/96-%D0%B2%D1%80> (дата звернення 07.01.2024)

97. Про особливості утворення публічного акціонерного товариства залізничного транспорту загального користування. Закон України від 23.02.2012 р. №4442-VI. Дата оновлення: 06.01.2018 р. URL: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/4442-17> (дата звернення 18.01.2024).

98. Транспорт України 2020: Статистичний збірник / за ред. І. Петренко. Київ: Державна служба статистики України, 2021. 116 с.

99. АТ Укрзалізниця. Офіційний сайт : веб-сайт. URL: <https://uz.gov.ua/> (дата звернення 20.01.2024).

100. Стратегія АТ «Укрзалізниця» на 2019-2023 роки. Стратегія-2 : веб-сайт URL: <https://bit.ly/3kiKGgL> (дата звернення 04.01.2024).

101. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року. Закон України від 30.05.2018 р. №430-р. Дата оновлення: 03.05.2023 р.

URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80> (дата звернення 04.06.2024).

102. Дикань В.Л., Данько І., Кондратюк М.В. Удосконалення організаційної структури залізничного комплексу України в сучасних умовах: монографія. Харків: УкрДАЗТ, 2010. 190 с.

103. Овчиннікова В. О. Особливості державного регулювання розвитку залізничного транспорту в Україні. *Економіка і суспільство*. Мукачеве, 2017. Вип. 12. С. 129-135. 167

104. Ейтутис Г. Д. Теоретико-практичні основи реформування залізниць України : монографія. Ніжин : ТОВ Видавництво «Аспект- Поліграф», 2009. 240 с.

105. Дикань В.Л. Обеспечение конкурентоспособности железнодорожного транспорта как основной составляющей его экономической безопасности. *Вісник Одеського національного університету. Економіка*. Одеса, 2016. Т.21. Вип. 1 С. 82-85.

106. Дейнека О .Г. Сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку підприємств залізничного транспорту. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків. 2013. Вип. 135. С.131-135.

107. Про запобігання поширенню на території України коронавірусу COVID-19 : Постанова від 11.03.2020 № 211. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zapobigannya-poshim110320rennyu-na-teritoriyi-ukrayini-koronavirusu-covid-19>

108. Зоріна О.І., Нескуба Т.В., Мкртичян О.М. Прогнозування транспортних послуг : конспект лекцій. Харків : УкрДУЗТ, 2021. 67 с. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/5688/1/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82%20%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D0%B9.pdf>

109. Hurieieva K., Kudin O., Lisnyak A. Anower view of machine learning methods for financial time series forecasting. *Visnyk of Zaporizhzhya National University. Physical and Mathematical Sciences*. 2018. No. 2. P. 18–28. URL: <https://doi.org/10.26661/2413-6549-2018-2-03>

110. Ломотько Д. В. Формування транспортного процесу залізниць України на базі логістичних принципів. дисертація д-ра техн. Наук. Харків. 2008. 480 с.

111. «Укрзалізниця» змінила рух потягів через провалля на колії на Буковині: новий графік рейсів. *TCH.ua*. URL: <https://tsn.ua/ukrayina/ukrzaliznicya-zminila-ruh-potyagiv-cherez-provallya-na-koliyi-na-bukovini-noviy-grafik-reysiv-1874575.html>

112. Ожидів. Рік після найбільшої фосфорної аварії в Україні. *Радіо Свобода*. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/1183922.html>

113. Через аварію на залізниці ковельський потяг пустили в об'їзд. *Ковель media*. URL: <https://kovel.media/cherez-avariyu-na-zaliznyczi-kovelskyj-potyag-pustyly-v-obyizd>

114. Удодова О. І., Шувалова Ю. С., Рибачук О. В. Елементи теорії графів : методичні вказівки та завдання до виконання контрольних та розрахункових робіт з розділу "Дискретна математика" дисципліни "Вища математика". кафедра вищої математики. - Харків : УкрДУЗТ, 2018. - 42 с.

115 Строева В.О., Сянов О.М., Застосування генетичних алгоритмів для розв'язання транспортних задач. *Математичне моделювання*. 2023. № 2(49). С. 148–155. URL: [https://doi.org/10.31319/2519-8106.2\(49\)2023.293181](https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(49)2023.293181)

116. Шейко М.В. Застосування генетичних алгоритмів для вирішення задачі транспортних перевезень. *Новітні інформаційні системи та технології*. Полтава: ПНТУ, 2014. Т. (1). URL: <http://journals.nupp.edu.ua/mist/article/view/472>

117. Бажан С. Використання генетичних алгоритмів із застосуванням випадкових процесів при розв'язуванні задач оптимізації. *Grail of Science*. 2023. № 33. С. 253–261. URL: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.10.11.2023.40>

118. Прохоров В. М., Рябушка Ю. А. Розрахунок плану формування поїздів на основі стохастичної комбінаторної оптимізації. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. Вип. 165. С. 215-224.

119. Константинов Д. В., Івань О. М. Удосконалення системи формування раціональних маршрутів прямування міжрегіональних пасажирських поїздів на залізницях України. *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of*

Railway Transport. 2016. № 164. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.164.2016.92627>

120. Кононюк А.Ю. Нейроні мережі і генетичні алгоритми. Київ : "Корнійчук", 2008. 470 с.

121. Лючков Д. С., Примаченко Г. О. Єдиний технологічний процес обробки транспортних засобів. Оперативне управління при взаємодії видів транспорту : методичні вказівки до практичних занять з дисципліни "Взаємодія видів транспорту": кафедра транспортних систем та логістики. Харків. 2018. 19 с.

122. Рачинська А. В. Сутність та класифікація ризиків на залізничному транспорті. *Ефективна економіка*. 2016. №11. URL: irbis-nbuv.gov.ua

123. Кульова Д. О., Кравець А. Л., Киман А. М. Ризик-орієнтовані технології перевезень : конспект лекцій. Частина 1 Харків : УкрДУЗТ. 2023. 70 с.

124. Пенькова К., Кривінчук Ю., Прядко К. Моделі функціонування залізничних перевезень. Огляд іноземного досвіду. *Інформаційна довідка, підготовлена Європейським інформаційно дослідницьким центром на запит народного депутата України*. 2017. URL: <https://infocenter.rada.gov.ua/uploads/documents/29219.pdf>.

125. Поїзний диспетчер. Професії за напрямками : веб-сайт. URL: <https://poprofessii.in.ua/uk/poezdnoj-dispatcher>

126. Лаврухін О.В. Удосконалення автоматизованого робочого місця поїзного диспетчера з використанням нечіткої логіки: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20. Харків, 2004. 233 с.

127. Кондратенко Ю. П., Кондратенко Г. В., Сіденко Є. В. Нечіткі множини та нечітка логіка : метод. рек. та вказівки для виконання лабораторних робіт студентами спец. 122 «Комп'ютерні науки», під ред. Ю. П. Кондратенка. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2019. 36 с. (Методична серія ; вип. 267).

128. Шубін І. Ю., Ашурова О. А. Нечіткі множини та нечітка логіка як інструмент формалізації вимог Інформаційні системи та технології : матеріали 9-ї Міжнар. наук.-техн. конф., 17-20 листопада 2020 р. Харків : Друкарня Мадрид, 2020. С. 64–68.

129. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. [чинний від 1997-01-01]. Вид. офіц. Київ, 1997. 32 с. (Інформація та документація)

130. Прокопенко Т. О. Теорія систем і системний аналіз : навч. посіб. М-во освіти і науки України. Черкаси : ЧДТУ, 2019. 139 с.

131. Є. А. Лавров. Математичні методи дослідження операцій : підручник. Суми 2017. 212 с.

132. Бутько Т.В., Лаврухін О.В., Прохоров В.М. Розробка моделі інтелектуальної системи підтримки прийняття рішення по управлінню процесом приймання-відправлення поїздів на залізничній станції. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2008. Вип. 3. С. 61-65.

133. Родкевич О.Г. Застосування математичного апарату теорії масового обслуговування для моделювання транспортних подій. *Організація перевезень і безпека транспорту*. 2014. С. 171-182.

134. Лаврухін О.В. Удосконалення управління перевізним процесом на основі теорії нечітких множин. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2003. Вип. 53. С. 78–82.

135. Данько М.І., Лаврухін О.В., Рибальченко Л.І. Оптимізація використання порожнього парку вагонів за допомогою генетичних алгоритмів. *Зб. наук. Праць УкрДАЗТ*. 2011. Вип. 122. С. 7-12.

136. Види й типи організаційних структур та умови їх ефективного застосування. Підручники : веб-сайт. URL: https://pidru4niki.com/10880405/menedzhment/vidi_tipi_organizatsiynih_struktur_umovi_efektivnogo_zastosuvannya

137. Калабухін Ю. Є, Шраменко О. В. Визначення економічного ефекту заходів науково-технічного прогресу на залізничному транспорті: методичні вказівки до виконання економічної частини дипломного проекту для студентів спеціальності "Електричний транспорт". Частина 2, кафедра „Економіка, організація та управління підприємством”. Харків : УкрДАЗТ, 2011. 30 с.

138. Гудкова, В. П. Оцінка ефективності функціонування і розвитку підприємств пасажирського транспорту. *Проблеми і перспективи розвитку підприємництва : збірник наукових праць*. . Харків. 2014. № 1 (6). С. 62–66.

139. Прохорченко А. В. Залізничні системи з вертикальним розділенням. Європейська модель. Дніпро : ЛІРА, 2022. 316 с.

140. Модель корпоративного управління та цільової організаційної структури АТ «Українська залізниця». Міністерство інфраструктури України : веб-сайт. URL: <https://www.slideshare.net/Ministerstvo/v-49267881>

Додаток А

Аналіз пасажирського вагонного парку АТ «Укрзалізниця» станом на кінець 2023 року.

Вид використання	Кількість вагонів																	
	Усього	ПКВЧ-1	ПКВЧ-2	ПКВЧ-3	ПКВЧД-8	ПКВЧД-6	ПКВЧД-14	ПКВЧ-5	ПКВЧД-3	ПКВЧД-13	ПКВЧ-4	ПКВЧ-7	ПКВЧ-6	ПКВЧ-8	ПКВЧД-11	ПКВЧД-7	ПКВЧ-9	ПКВЧД-2
Приписний парк	3578/139	719/27	115/1	152	281/29	177/15	160/12	120	347/13	169/5	86/4	285/7	48/1	79/5	300/15	193/1	132/2	215/2
У поїздах	1331/36	335/4	29	15	112/12	72/1	71/1	48	117/1	2/1	19	109/6	42	46/2	131/7	149	34/1	
з них: Дал.сполуч.	1212/15	327/2	27	12	104/8	70	69	48	102	/1	14	106/2	26	28	101/1	149	29/1	
Місцевих	1			2													1	
Приміських	78		2	2					12	2	5		16	16	19		4	
Неграфікових	40/21	8/2		1	8/4	2/1	2/1		3/1			3/4		2/2	11/6			
Під формуван. у поїзди	150/3	8	2	8	23	11	9	3	21		7	7	8	6	31/3		6	
У технологічному резерві	177/6	33	12	3	15/5	13	10	9	14		11		15	15/1	4	20	3	
У відстої	186/27	8/8	15	17	/3	16	14	3	13/5	11		15/3	1/1	11	9/7	5	48	
з них: Потреб.план.ремонту*	19/1	/1	2	1		3			1					3	4		5	
Потреб. обстеження*	20/1		3	2				1				6		1	/1		7	
Придатні після відповід. підготовки	147/25	8/7	10	14	/3	13	14	2	12/5	11		9/3	1/1	7	5/6	5	36	
У ремонті в депо	38/1	14		10	3/1		2			1	1	2			2	3		
У пересилці в депо	48/2	2		1	1	5		2	1	4	3	2	2	9/1	5/1	9	2	
У ремонті на заводах																		
з них: ДВРБ																		
ЖВРЗ																		
ХВСЗ																		
КЗРДП																		
PESA																		
У пересилці на заводи	1		1															
На рекламациї(повт.рем.)	7	7																
У пересилці з депо	17/1	2				1		1			1	1	2	2	1/1	5	1	
У пересилці з заводів																		
Очікують ремонту**	586/8	95/1	29	15	92/5	44	10	8	59/1	15	15	52/1	16	31	18	63	24	
з них: КР-2(М),КВР,КРП	106/5	25	21	14	16/5	3	1		3		5	12	2	3	1			
КР-1	229/2	16	5		49	22	3	3	44/1	9	5	20/1	13	12	4	17	7	
ДР	174	40	3	1	23	17	4	2	11	2	4	13	1	1	7	37	8	
ТО-3**	44	8					2	2	1	2		6		6	4	9	4	
ПР(поточного рем.)**	33/1	6/1			4	2		1		2	1	1		9	2		5	
Очікують обстеження	83/10	33/3	3	4	3	3/4		4	1/1	11/2	5	1				13	2	
Очікують виключення	520/26	93/3	10	24	16/7	38/1	23/6	24	58	41/2	8	31	2	12	89/6	41/1	10	
Під сл.приміщ.та.житло	95/5	27/4	2	2	17	3	1	5	11	3	6	5	3		5/1	5		
На непідконтрольних тер.	296/3	17	1	11	7	4	5		16/1	3	5	25			10	4	4	184/2
В оренді	7/7	/4			5	1			1/3									
У спецформуваннях	27	8		2		2	3	2			8			1	1			
Відрядж. на інші підрозд.	506/32	82/1	13/1	43	12/5	9/10	13/5	27	42/1	80	11/4	66	4	9/4	20	3	41/1	31
Прикоманд.з інших підрозд.	528/28	45/1	2	3	25/9	45/1	1	16	7	2	14	31/3	47	63/3	26/11	128	43	30
Наявний парк	3304/132	665/27	103	101	287/33	209/6	143/7	109	296/11	88/5	84	225/10	91/1	133/4	296/26	314/1	130/1	30

В усіх графах через "/" враховуються вагони основних / допоміжних перевезень.

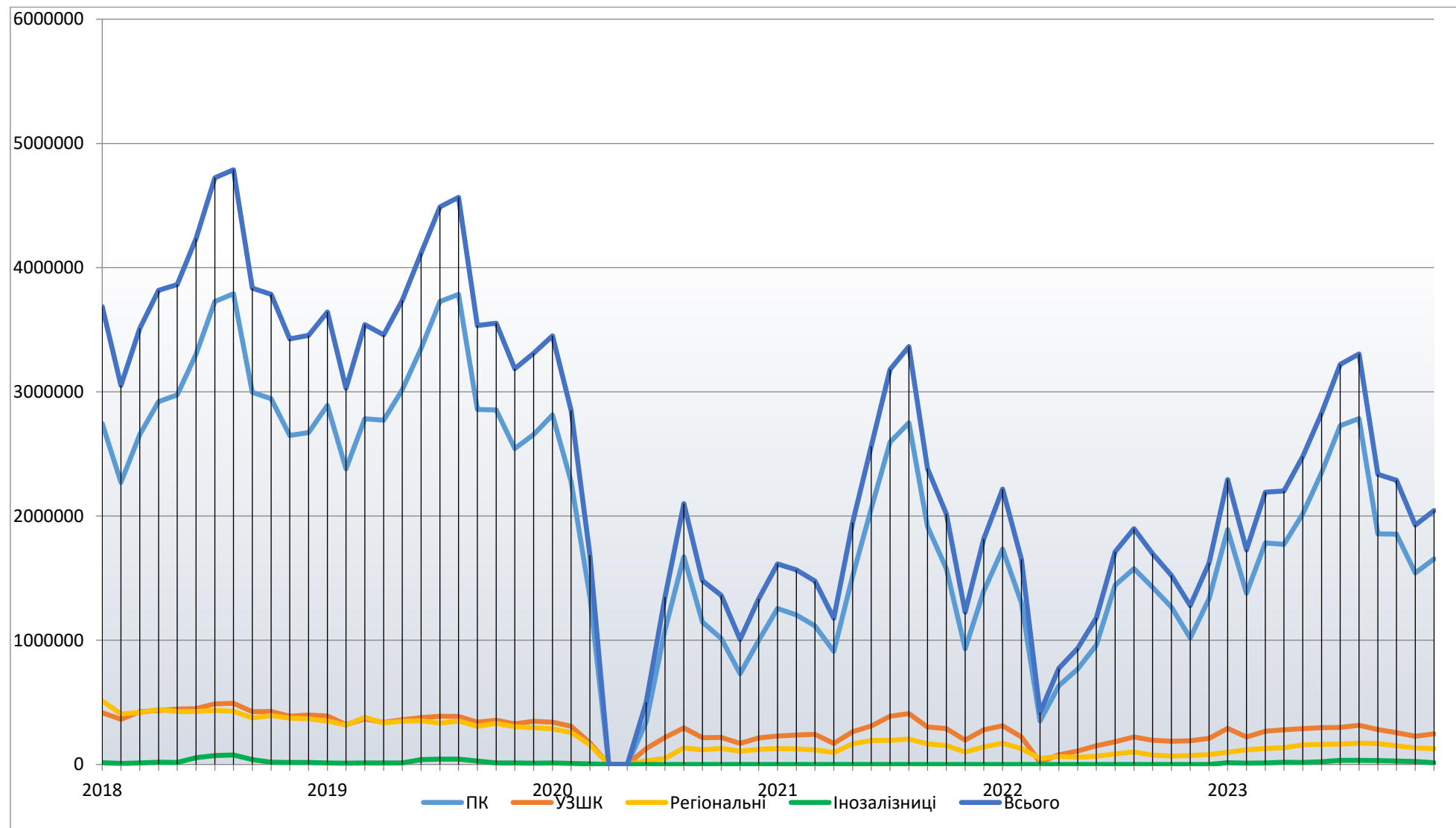
* Вагони, що потребують планового ремонту або обстеження, але не оформлені ф.ЛВУ-23.

** Вагони, що знаходяться в очікуванні, пересилці та ремонтах ТО-3 і ПР.

В перелік вагонів, які знаходяться на непідконтрольних територіях не включено прикомандировані вагони

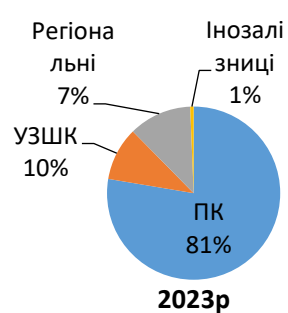
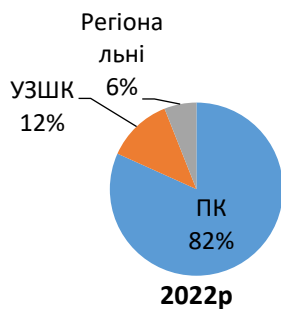
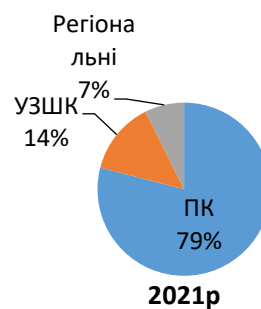
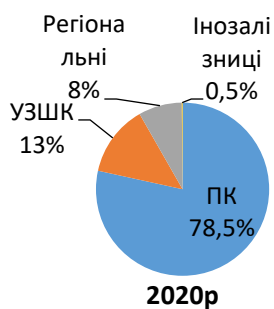
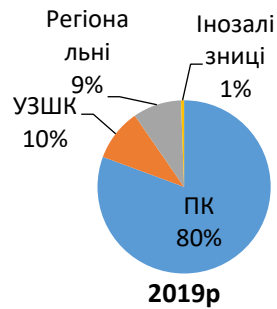
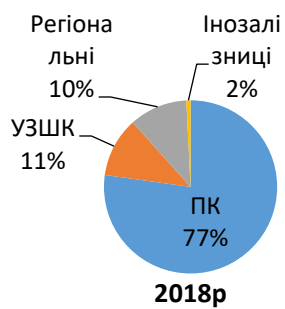
Додаток Б

Загальна кількість перевезених пасажирів залізничним транспортом за 2018-2023 роки



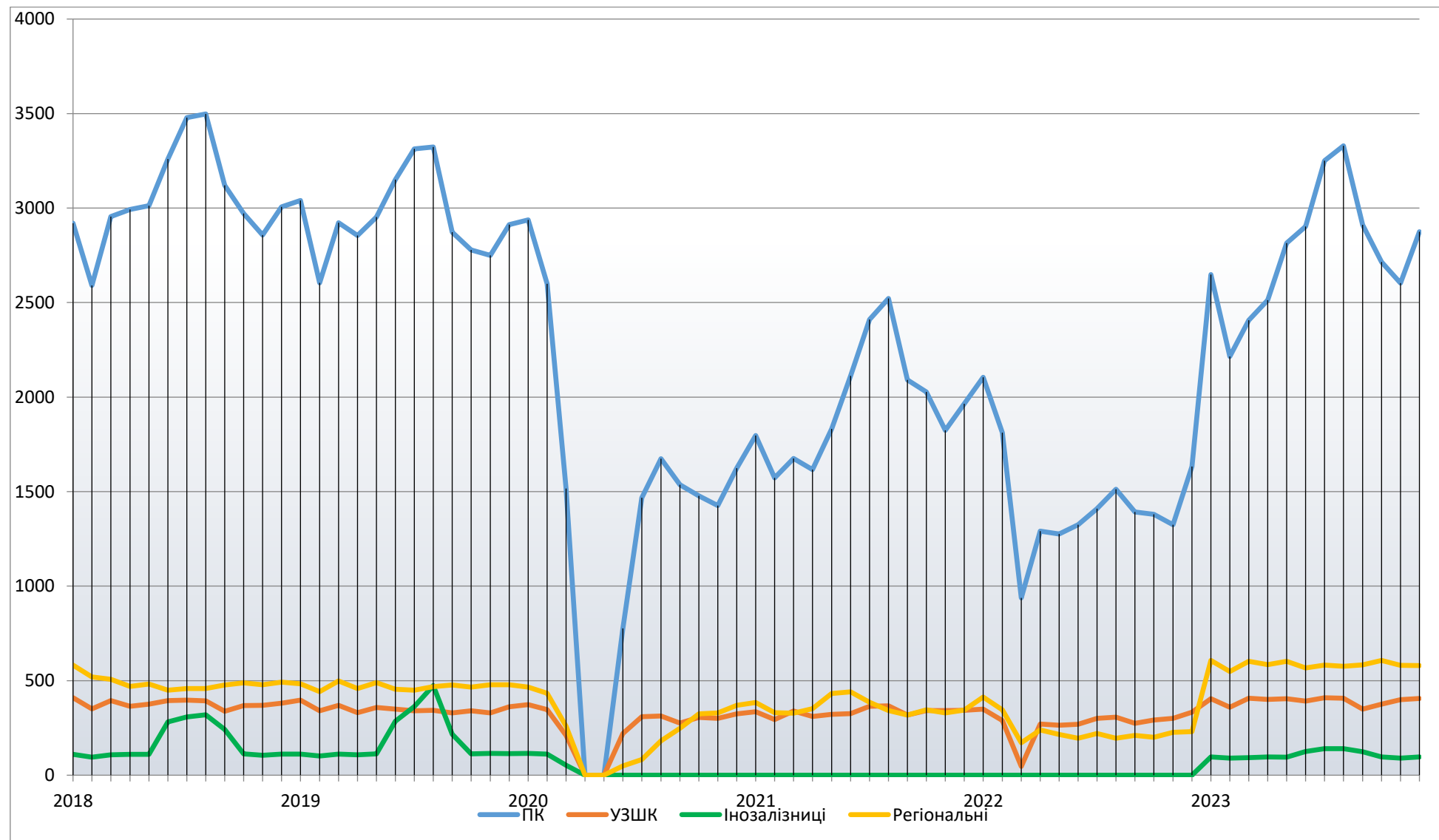
Додаток В

Частки перевезених пасажирів в залежності від категорій поїздів за 2018-2023 роки



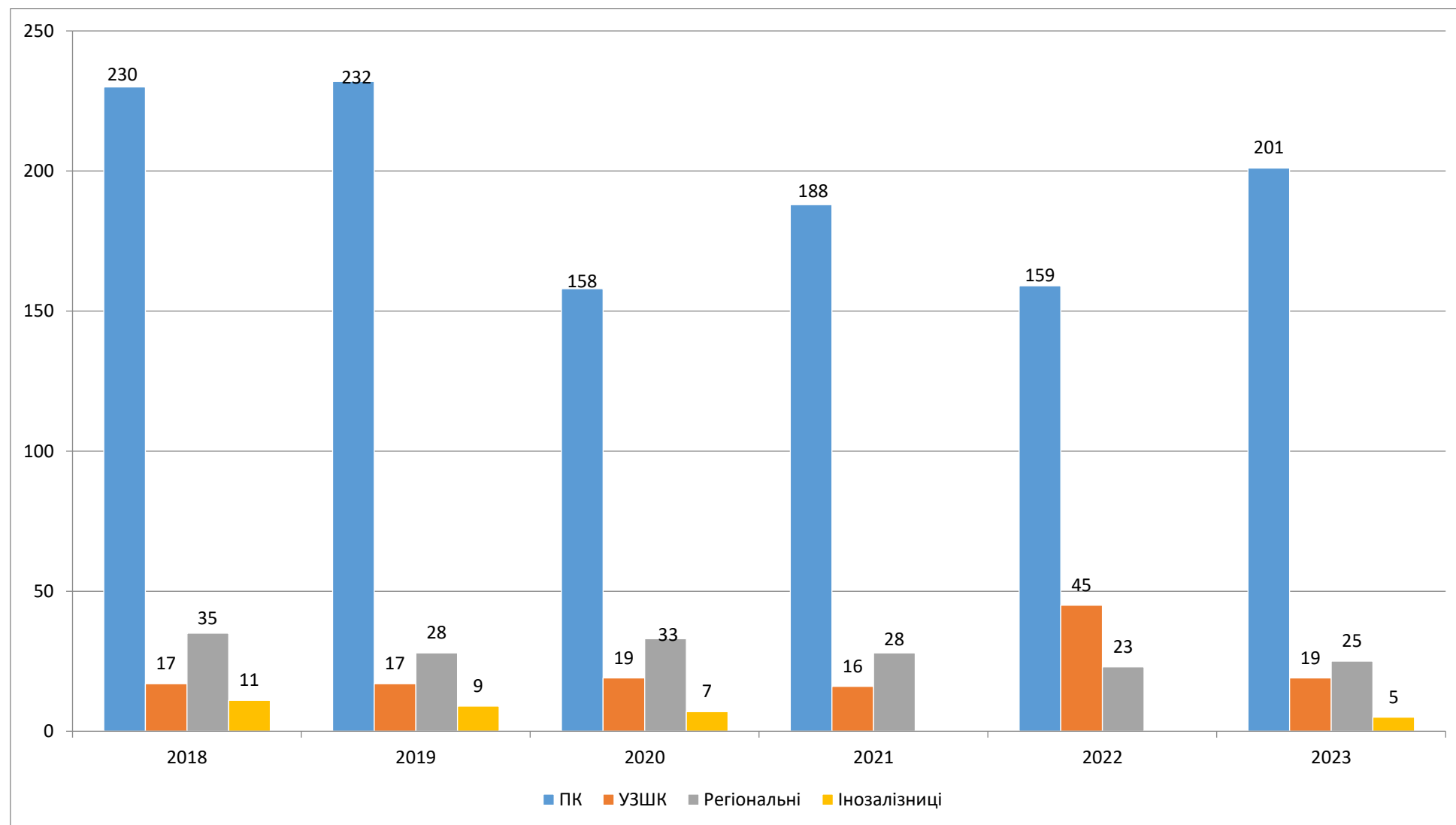
Додаток Г

Загальна кількість рейсів пасажирських поїздів за 2018-2023 роки.



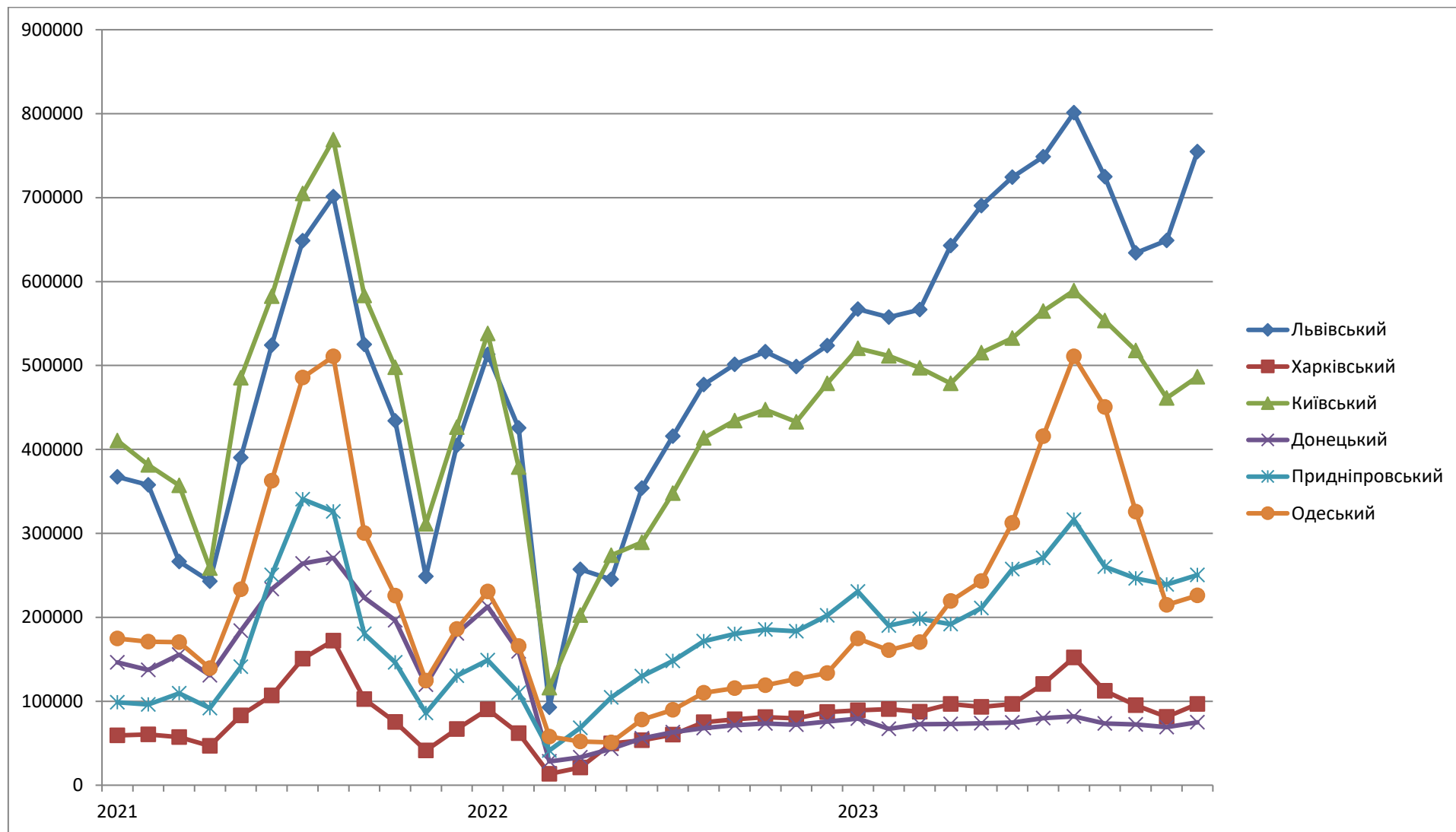
Додаток Д

Кількість пар пасажирських поїздів за 2018-2023 роки



Додаток Е

Кількість перевезених пасажирів поїздами дальнього сполучення за напрямками за 2021-2023 роки



Додаток Ж

Кількість перевезених пасажирів поїздами філії УЗШК за 2021-2023 роки

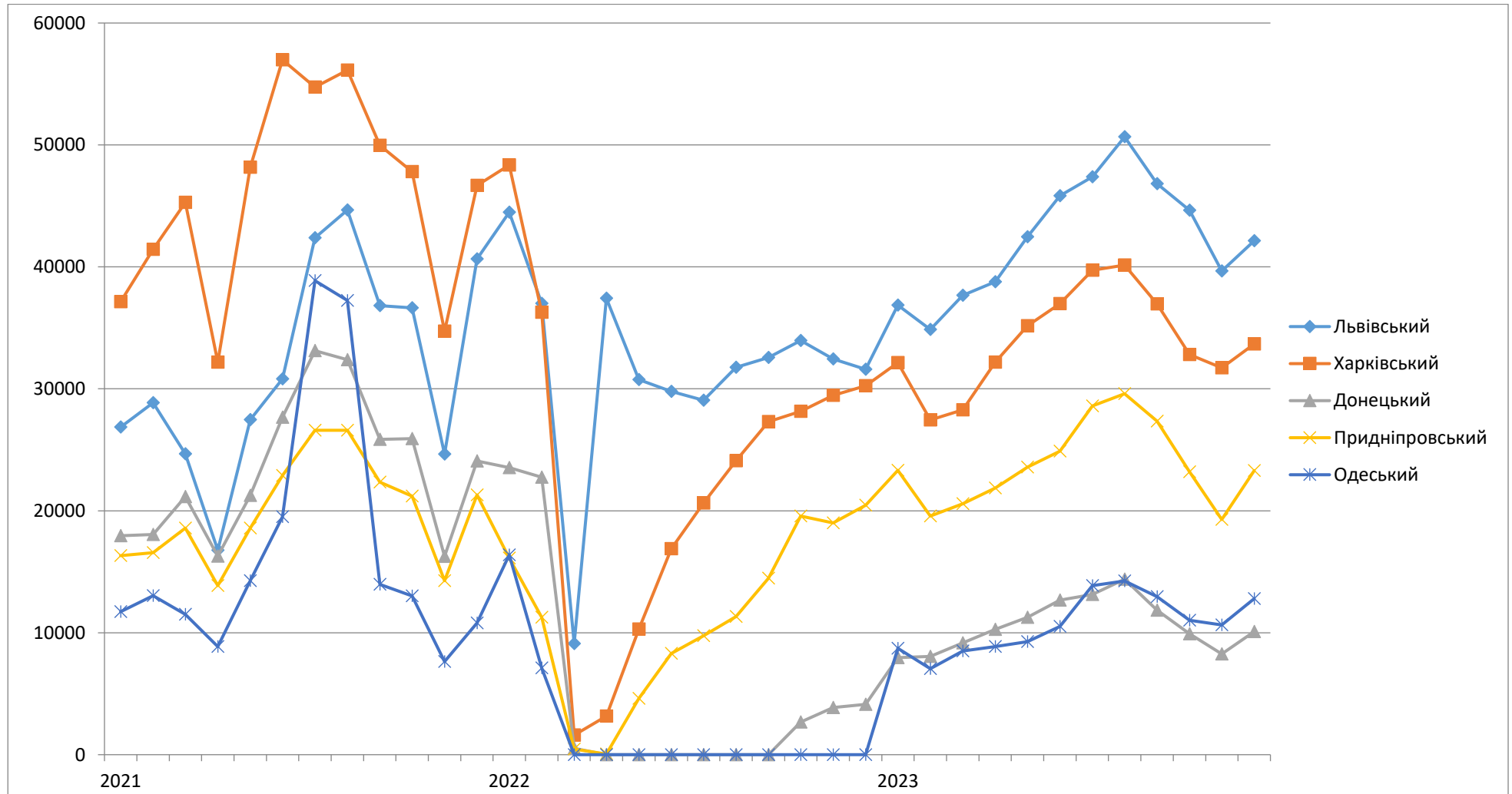


Рисунок Ж.1 Кількість перевезених пасажирів поїздами філії УЗШК в прямому напрямку (від Києва) за 2021-2023 роки

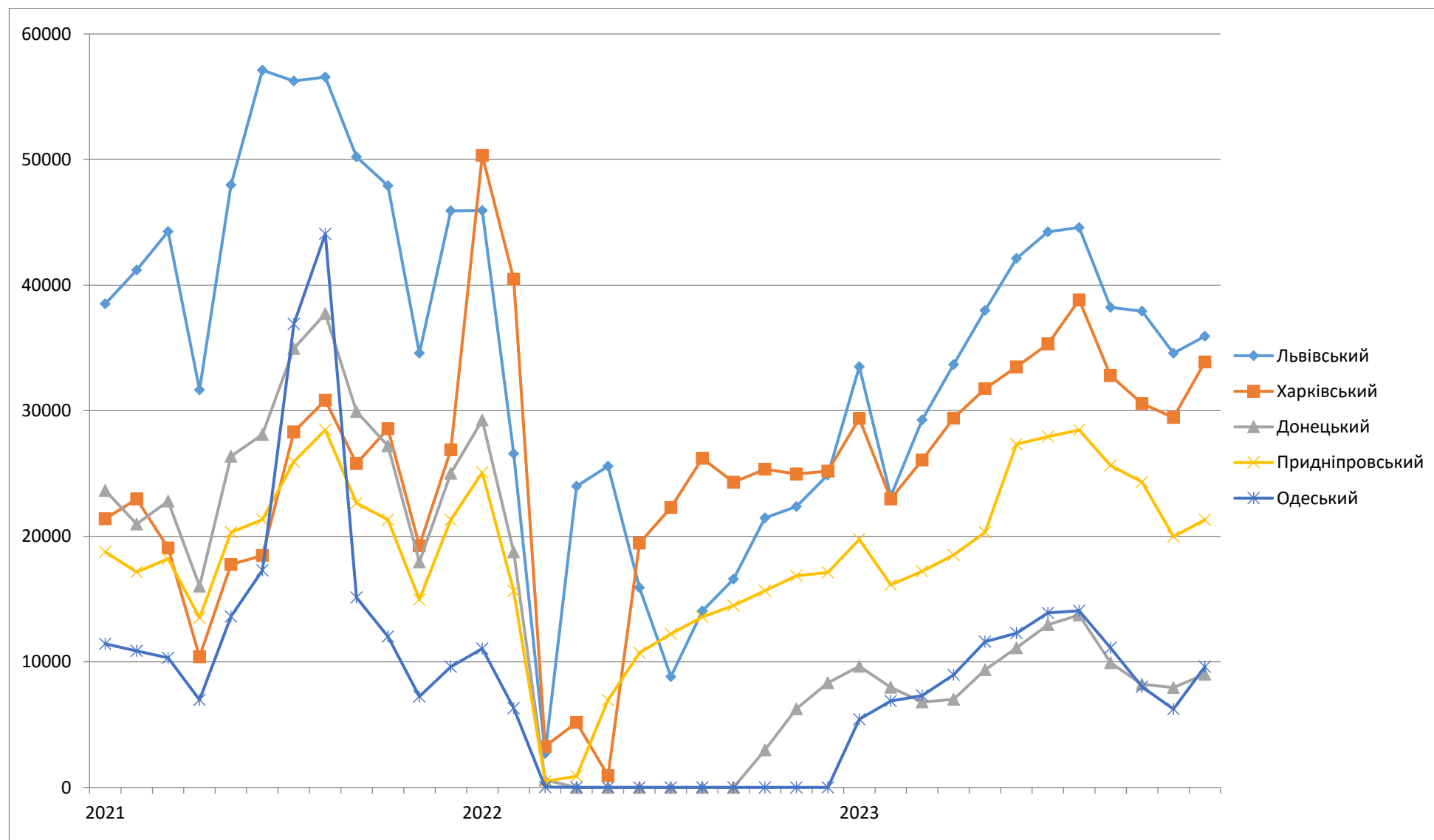


Рисунок Ж.2 Кількість перевезених пасажирів поїздами філії УЗШК в зворотному напрямку (до Києва) за 2021-2023 роки

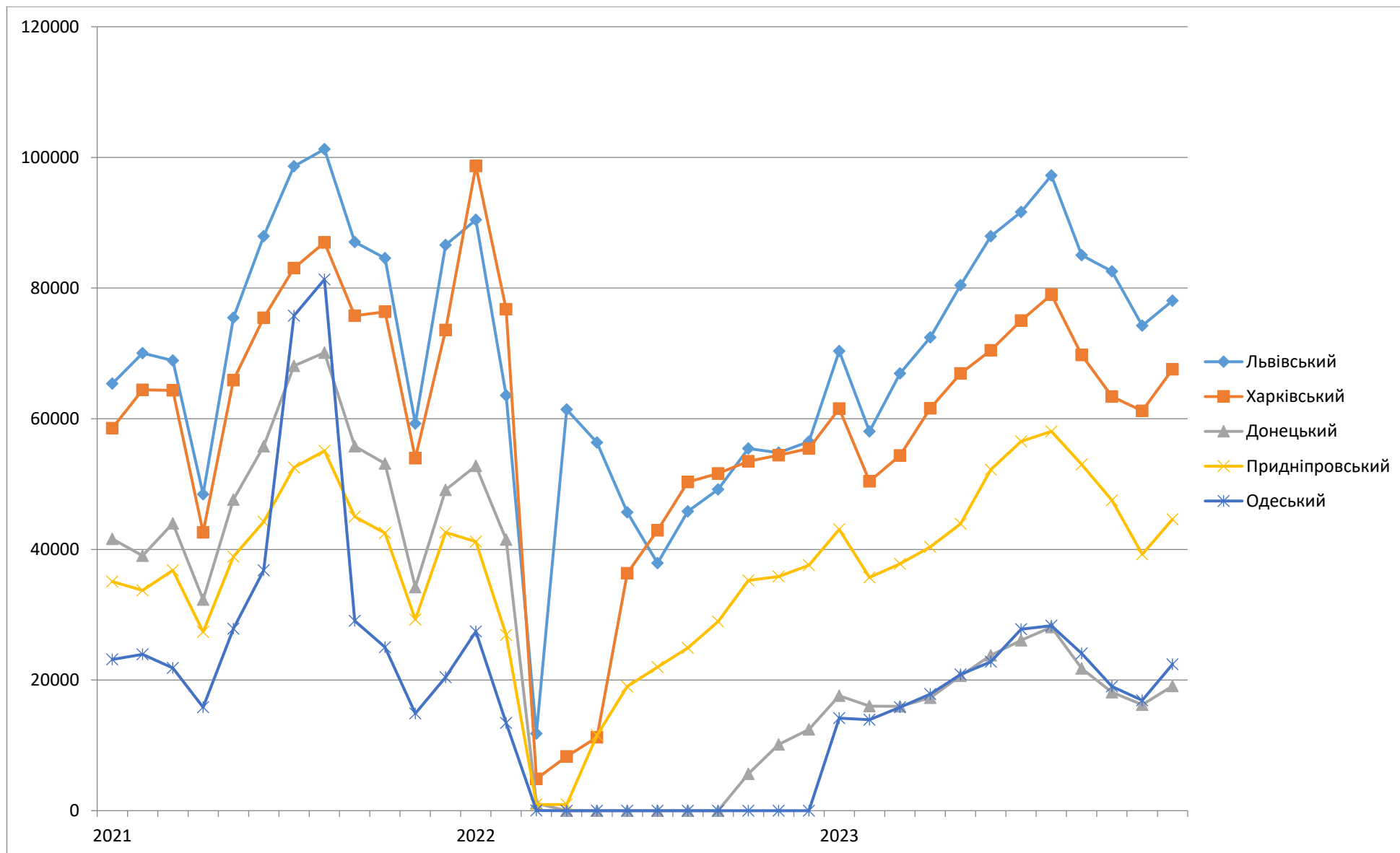


Рисунок Ж.3 Загальна кількість перевезених пасажирів поїздами філії УЗШК за напрямками у 2021-2023 роках

Додаток И

Населеність поїздів філії УЗШК за 2021-2023 роки

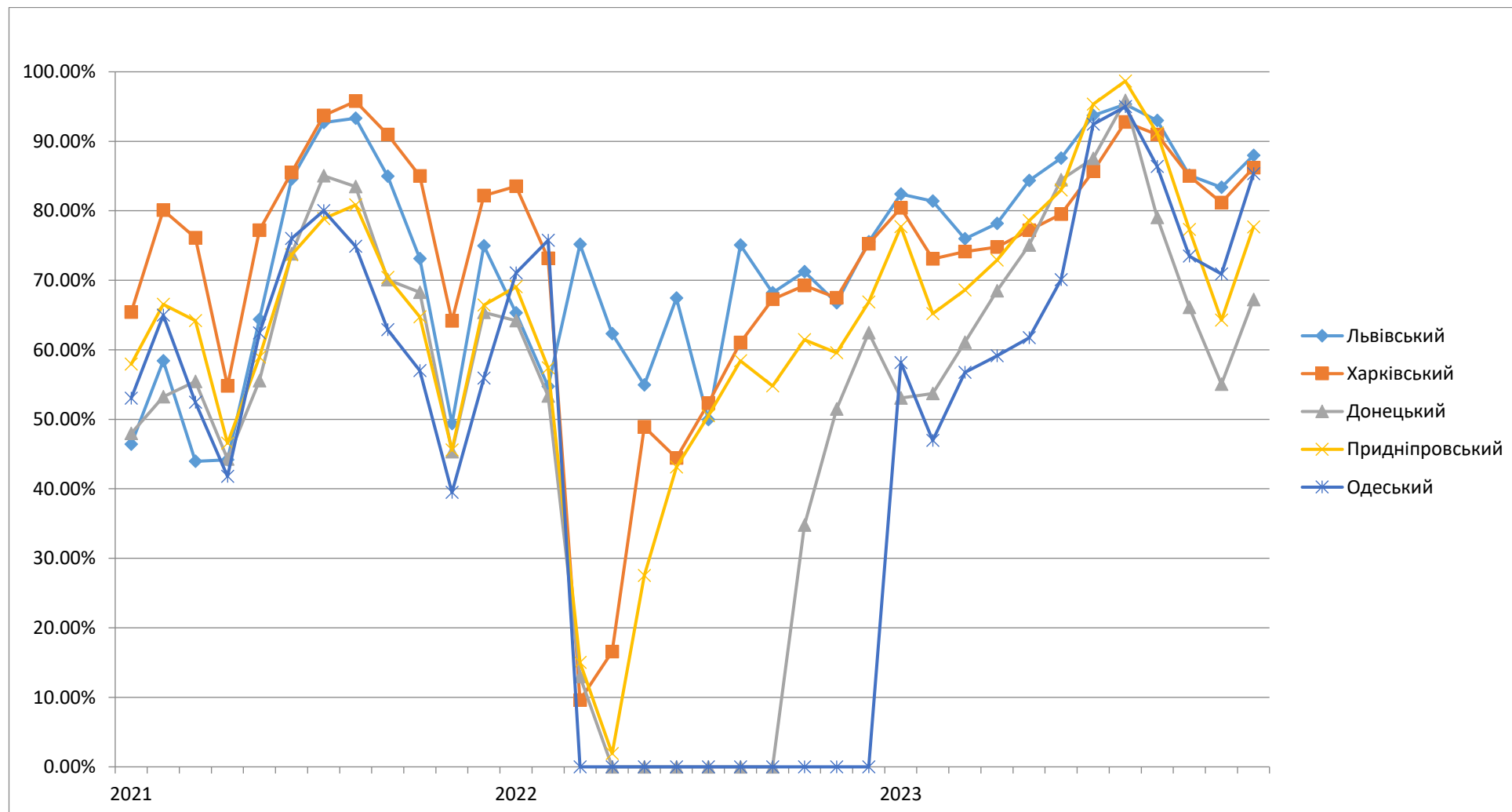


Рисунок И.1 Населеність поїздів філії УЗШК в прямому напрямку (від Києва) за 2021-2023 роки.

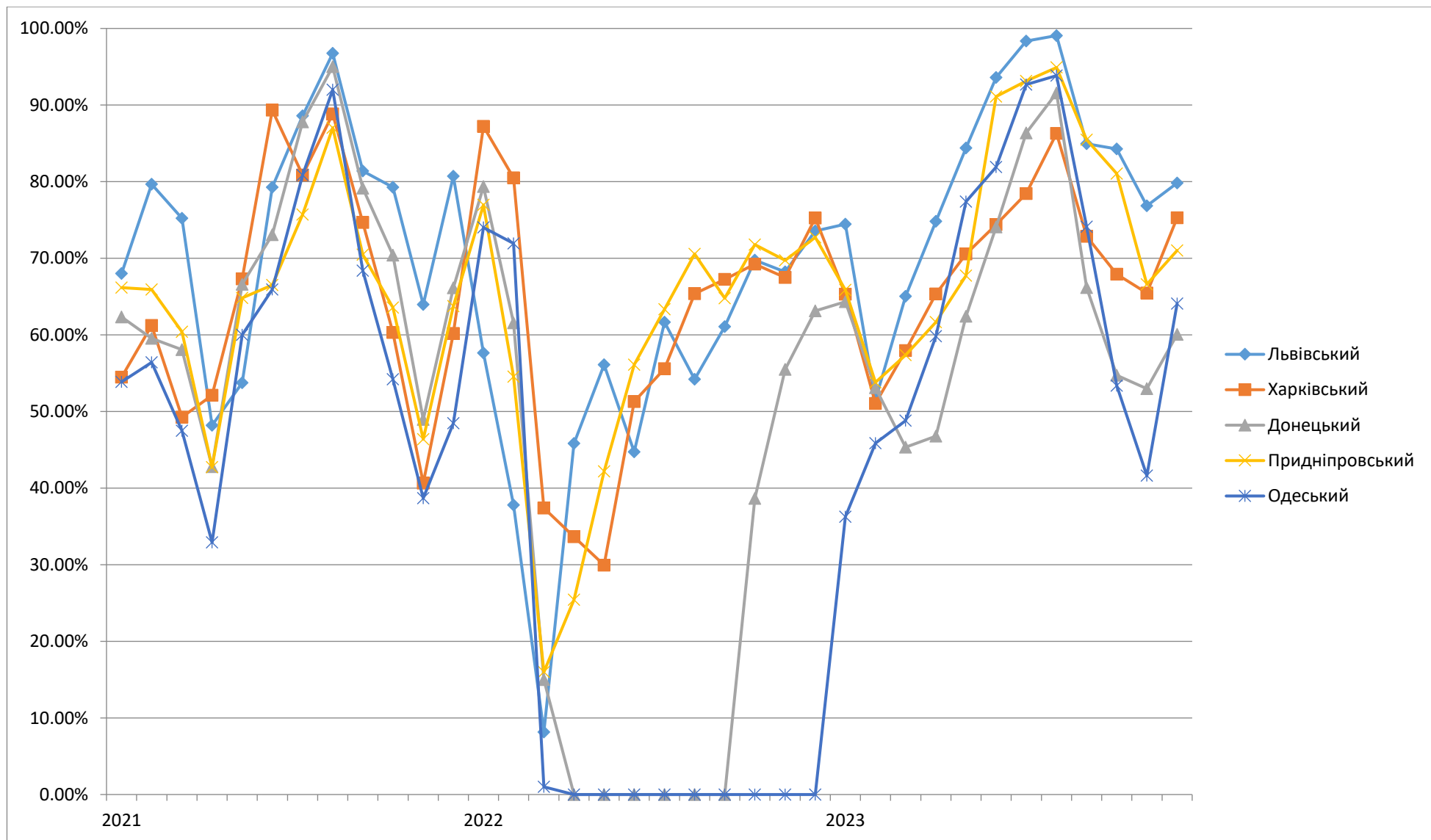


Рисунок И.2 Населеність поїздів філії УЗШК в зворотному напрямку (до Києва) за 2021-2023 роки

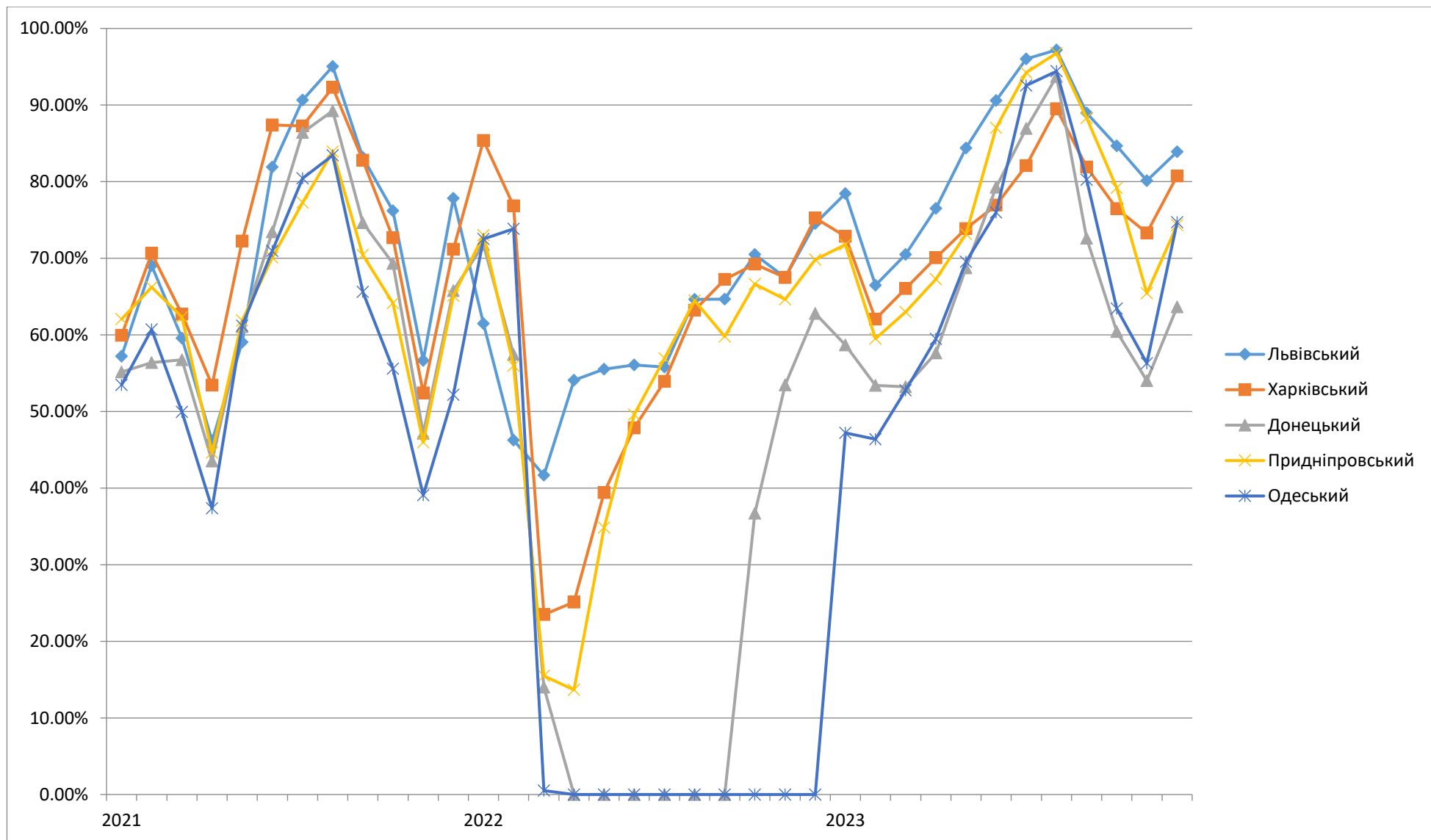


Рисунок И.3. Населеність поїздів філії УЗШК за напрямками у 2021-2022 роках

Додаток К

Фрагмент віхдних даних для прогнозування посадки та висадки пасажирів по ст
Вінниця на поїзд №715

Дата	День тижня x1	Місяць x2	Номер тижня x3	Святковий день x4	Посадка пасажирів x5	Висадка пасажирів x6
01.01.2023	6	1	52	1	168	183
02.01.2023	0	1	1	0	161	83
03.01.2023	1	1	1	0	53	115
04.01.2023	2	1	1	0	104	47
05.01.2023	3	1	1	0	170	179
06.01.2023	4	1	1	0	104	44
07.01.2023	5	1	1	1	69	194
08.01.2023	6	1	1	0	161	167
09.01.2023	0	1	2	0	125	180
10.01.2023	1	1	2	0	65	49
11.01.2023	2	1	2	0	137	184
12.01.2023	3	1	2	0	24	200
13.01.2023	4	1	2	0	85	121
14.01.2023	5	1	2	0	169	136
15.01.2023	6	1	2	0	89	125
16.01.2023	0	1	3	0	127	93
17.01.2023	1	1	3	0	21	88
18.01.2023	2	1	3	0	48	27
19.01.2023	3	1	3	0	80	142
20.01.2023	4	1	3	0	119	116
21.01.2023	5	1	3	0	147	120
22.01.2023	6	1	3	0	163	20
23.01.2023	0	1	4	0	116	114
24.01.2023	1	1	4	0	116	26
25.01.2023	2	1	4	0	33	81
26.01.2023	3	1	4	0	62	130
27.01.2023	4	1	4	0	190	106
28.01.2023	5	1	4	0	89	106
29.01.2023	6	1	4	0	74	142
30.01.2023	0	1	5	0	50	27
31.01.2023	1	1	5	0	95	83
01.02.2023	2	2	5	0	187	155
02.02.2023	3	2	5	0	174	150
03.02.2023	4	2	5	0	71	146
04.02.2023	5	2	5	0	147	146
05.02.2023	6	2	5	0	26	179
06.02.2023	0	2	6	0	193	135

Додаток Л
Координати для побудови графа G

	пн.ш			сх.д		
Київ	50°	26'	26"	30°	29'	22"
Миронівка	49°	38'	53"	30°	58'	50"
Фастів	50°	04'	44"	29°	55'	48"
Цвітково	49°	09'	13"	31°	31'	45"
Христинівка	48°	48'	47"	29°	58'	20"
Зятківці	48°	42'	36"	29°	26'	40"
Вапнярка	48°	32'	01"	28°	44'	41"
Козятин	49°	42'	41"	28°	50'	20"
Калинівка	49°	25'	52"	28°	31'	46"
Вінниця	49°	14'	22"	28°	30'	38"
Жмеринка	49°	02'	02"	28°	06'	43"
Коростень	50°	57'	25"	28°	38'	05"
Житомир	50°	16'	05"	28°	41'	52"
Бердичів	49°	53'	21"	28°	36'	47"
Новоград-волинський	50°	35'	52"	27°	35'	35"
Шепетівка	50°	11'	57"	27°	03'	40"
Старокостянинів	49°	44'	01"	27°	16'	44"
Хмельницький	49°	26'	31"	26°	55'	50"
Ярмоленці	49°	10'	43"	26°	48'	15"
Сарни	51°	19'	37"	26°	37'	59"
Рівне	50°	37'	11"	26°	15'	05"
Здолбунів	50°	31'	41"	26°	15'	26"
Тернопіль	49°	33'	14"	25°	36'	03"
Копиченці	49°	06'	31"	25°	54'	43"
Ківерці	50°	49'	54"	25°	28'	22"
Луцьк	50°	45'	28"	25°	21'	03"
Красне	49°	37'	31"	24°	37'	31"
Ходорів	49°	24'	02"	24°	18'	33"
Львів	49°	50'	23"	23°	59'	40"
Стрий	49°	15'	34"	23°	50'	30"
Славське	49°	18'	04"	23°	39'	47"
Самбір	49°	12'	00"	23°	12'	43"
Перемишль	49°	47'	00"	22°	46'	00"

Додаток М

Матриці суміжності для графа G

Таблиця М.1 Матриця суміжності за часом для Львівського напрямку для швидкісних пасажирських поїздів (через дріб позначено час для поїздів «шатлів» на ділянках з максимальною швидкістю більше 100 км/год)

	КИЇВ	Коростень	Миронівка	Фастів	Козятин	Житомир	Бердичів	Калинівка	Вінниця	Жмеринка	Цвітково	Христинів ^а	Зятківці	Вапнярка	Хмельницький	Старокостянтинів	Шепетівка	Новоград-Волинський	Тернопіль	Ярмолинці	Копичинці	Красне	Здолбунів	Рівне	Сарни	Ківерці	Холерів	Стрий	Славське	Перемишль	Самбір	Луцьк	ЛЬВІВ
КИЇВ	X	1,42/ 1,66	0,9/ 1,18	0,6/0,7																													
Коростень	1,42/ 1,66	X			0,95													0,71/ 0,94							2,07								
Миронівка	0,9/ 1,18		X	1,05/ 1,15							0,78/ 0,82																						
Фастів	0,6/0,7		1,05/ 1,15	X	0,82 / 0,97	1,3																											
Козятин				0,87/ 0,97	X		0,23 / 0,28	0,37/ 0,42				3,7																					
Житомир		0,95		1,3		X	0,56												1,07														
Бердичів					0,23/ 0,28	0,56	X											1,05/ 1,25															
Калинівка					0,37/ 0,42			X	0,17/ 0,22							1,26																	
Вінниця								0,17/ 0,22	X	0,38/0, 5			2,37																				
Жмеринка									0,38/0, 5	X				0,7/ 0,84	1/ 1,12																		
Цвітково			0,78/ 0,82								X	2,32																					
Христинівка					3,7						2,32	X	0,79																				
Зятківці									2,37			0,79	X	1,23																			
Вапнярка										0,7/ 0,84			1,23	X																			
Хмельницький											1/ 1,12				X	0,88			1,23/ 1,37	0,52													
Старокостянтинів								1,26							0,88	X	1,21																
Шепетівка							1,05/ 1,25									1,21	X	0,47/ 0,66	3,31					0,57/ 0,72									
Новоград-Волинський		0,71/ 0,94				1,07											0,47/ 0,66	X															
Тернопіль															1,23/ 1,37		3,31		X		1,09	0,83/ 0,97					1,47						
Ярмолинці															0,52					X	1,65												
Копичинці																			1,09	1,65	X												
Красне																			0,83/ 0,97			X	1,15/ 1,45										0,45 0,57
Здолбунів																	0,57/ 0,72					1,15/ 1,45	X	0,13									

Додаток М
(продовження)

Рівне																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
-------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Таблиця М.2 Матриця суміжності за часом для Львівського напрямку для автобусу при умовній швидкості 90 км/год

	КИЇВ	Коростень	Миронівка	Фастів	Козятин	Житомир	Бердичів	Калинівка	Вінниця	Жмеринка	Цвітково	Христинівка	Зятківці	Вапнярка	Хмельницький	Старокостянтинів	Шепетівка	Новоград-Волинський	Тернопіль	Ярмолинці	Копичинці	Красне	Здолбунів	Рівне	Сарни	Ківерці	Ходорів	Стрий	Славське	Перемишль	Самбір	Луцьк	ЛЬВІВ	
КИЇВ	X	1,73	1,20	0,70																														
Коростень	1,73	X				0,92																			1,72									
Миронівка	1,20		X	1,12																														
Фастів	0,70		1,12	X	1,05	1,12																												
Козятин				1,05	X		0,29	0,45				1,93																						
Житомир		0,92		1,12		X	0,55											0,95																
Бердичів					0,29	0,55	X										1,35																	
Калинівка					0,45			X	0,25							1,15																		
Вінниця								0,25	X	0,52			1,45																					
Жмеринка									0,52	X				0,90	1,10																			
Цвітково			0,83								X	1,65																						
Христинівка					1,93						1,65	X	0,53																					
Зятківці									1,45			0,53	X	0,80																				
Вапнярка										0,90			0,80	X																				
Хмельницький										1,10					X	0,57			1,32	0,43														
Старокостянтинів								1,15							0,57	X	0,78																	
Шепетівка							1,35									0,78	X	0,70	1,68				0,78											
Новоград-Волинський						0,95											0,70	X																
Тернопіль															1,32		1,68	X			0,82	0,98					1,29							
Ярмолинці															0,43					X	0,93													
Копичинці																			0,82	0,93	X													
Красне																			0,98			X	1,60										0,55	
Здолбунів																	0,78					1,60	X	0,13										
Рівне																							0,13	X	0,97	0,72								
Сарни		1,72																					0,97	X										
Ківерці																								0,72	X									
Ходорів																			1,29								X	0,45					0,70	
Стрий																											0,45	X	0,70			0,78		0,83
Славське																												0,70	X					
Перемишль																														X			1,08	
Самбір																												0,78			X			0,85
Луцьк																										0,15							X	1,63
ЛЬВІВ																						0,55					0,70	0,83		1,08	0,85	1,63	X	

Таблиця М.3 Матриця суміжності пропускових спроможностей дільниць

	КИЇВ	Коростень	Миронівка	Фастів	Козятин	Житомир	Бердичів	Калинівка	Вінниця	Жмеринка	Цвіtkово	Христинівка	Зятківці	Вапнярка	Хмельницький	Старокостянтинів	Шепетівка	Новоград-Волинський	Тернопіль	Ярмолинці	Копичинці	Красне	Здолбунів	Рівне	Сарни	Ківерці	Ходорів	Стрий	Славське	Перемишль	Самбір	Луцьк	Львів	
КИЇВ	Х	102	107	109														61																
Коростень	102	Х				32																			38									
Миронівка	107		Х	87							91																							
Фастів	109		87	Х	111	61																												
Козятин				111	Х			105				27																						
Житомир		32		61		Х	29											26																
Бердичів					102	29	Х										96																	
Калинівка					105			Х	112							34																		
Вінниця								112	Х	110			32																					
Жмеринка									110	Х				111	106																			
Цвіtkово			91								Х	33																						
Христинівка					27						33	Х	28																					
Зятківці									32			28	Х	29																				
Вапнярка										111			29	Х																				
Хмельницький										106					Х	33			104	27														
Старокостянтинів								34							33	Х	35																	
Шепетівка							96									35	Х	29	36				94											
Новоград-Волинський		61				26											29	Х																
Тернопіль															104		36		Х		27	101					33							
Ярмолинці															27					Х	24													
Копичинці																			27	24	Х													
Красне																			101			Х	102											104
Здолбунів																	94					102	Х	87										
Рівне																							87	Х	36	35								
Сарни		38																						36	Х									
Ківерці																								35		Х						29		
Ходорів																			33									Х	24				36	
Стрий																												24	Х	88		19		101
Славське																													88	Х				
Перемишль																															Х		65	
Самбір																																Х		34
Луцьк																																	Х	34
Львів																						104						36	101		65	34	34	Х

Додаток Н

Фрагмент коду програмного продукту для вирішення задачі маршрутизації на основі
ГА

```

function [xopt, fval, A_pred, B_pred] = optimize_route_with_nn(X_history, W, b, Xmin, Xmax, Ymin, Ymax, t,
Cshv, Cel, Ctepl, Caut, h, T_max)

% optimize_route_with_nn - оптимізує маршрут поїзда на основі прогнозованих A_r, B_r з FFNN

% Вхідні параметри:

% X_history — матриця 7x6 ознак за 7 днів (42 ознаки)

% W, b — ваги та зміщення нейромережі (структура з полями W1, b1, W2, b2, W3, b3)

% Xmin, Xmax — для мінімакс-нормалізації

% Ymin, Ymax — для денормалізації [Amin, Bmin], [Amax, Bmax]

% t — матриця часу проходження (IxIxK)

% Cshv, Cel, Ctepl, Caut — вартості поїздо-години

% h — матриця електрифікації IxI

% T_max — максимальний час маршруту

I = size(t,1); K = 3;

%% === ЕТАП 1: Прогноз A_r та B_r через FFNN ===

X = reshape(X_history', [], 1); % 42x1 вектор
Xn = (X - Xmin) ./ (Xmax - Xmin); % мінімакс нормалізація

z1 = W.W1 * Xn + b.b1;
a1 = 1./(1 + exp(-z1));
z2 = W.W2 * a1 + b.b2;
a2 = 1./(1 + exp(-z2));
z3 = W.W3 * a2 + b.b3;
a3 = 1./(1 + exp(-z3)); % [A_norm; B_norm]

A_pred = a3(1) * (Ymax(1) - Ymin(1)) + Ymin(1);
B_pred = a3(2) * (Ymax(2) - Ymin(2)) + Ymin(2);

%% === ЕТАП 2: Побудова моделі оптимізації ===

numVars = I*I*K;

```

```

[xi, xj, xk] = ndgrid(1:I, 1:I, 1:K);
idx = sub2ind([I, I, K], xi(:), xj(:), xk(:));

C = zeros(numVars, 1);
for n = 1:numVars
    i = xi(n); j = xj(n); k = xk(n);
    if k == 1
        C(n) = t(i,j,k) * (h(i,j)*Cshv + (1 - h(i,j))*Ctepl);
    elseif k == 2
        C(n) = t(i,j,k) * (h(i,j)*Cel + (1 - h(i,j))*Ctepl);
    else
        C(n) = t(i,j,k) * Caut;
    end
end
end

```

```

%% === ЕТАП 3: Обмеження ===

```

```

Aeq = []; beq = [];
Aineq = []; bineq = [];

```

```

% Заборона самопереходів

```

```

for k = 1:K
    for i = 1:I
        row = zeros(1, numVars);
        idxn = sub2ind([I, I, K], i, i, k);
        row(idxn) = 1;
        Aineq = [Aineq; row]; bineq = [bineq; 0];
    end
end
end

```

```

% Не більше одного типу транспорту на ділянці

```

```

for i = 1:I
    for j = 1:I
        if i ~= j

```



```

row = zeros(1, numVars);
for k = 1:K
    idxn = sub2ind([I, I, K], i, j, k);
    row(idxn) = 1;
end
Aineq = [Aineq; row]; bineq = [bineq; 1];
end
end
end

% Обмеження часу
Aineq = [Aineq; C']; bineq = [bineq; T_max];

%% === ЕТАП 4: Розв'язання задачі ===
intcon = 1:numVars; lb = zeros(numVars, 1); ub = ones(numVars, 1);
opts = optimoptions('intlinprog','Display','off');
[xopt, fval] = intlinprog(C, intcon, Aineq, bineq, Aeq, beq, lb, ub, opts);
End

```

Додаток П

Порівняння часу на пошук та вибір оптимального альтернативного маршруту для пасажирського поїзда в разі пошкодження залізничної інфраструктури.

			К-ть проміжних графікових зупинок	К-ть виключених залізничних дільниць	Чи на початковій станції поїзд?	Час на пошук та вибір оптимального рішення без використання створеної моделі, хв	Час на пошук та вибір оптимального рішення із використанням запропонованої моделі, хв	Співпадіння між отриманими рішеннями
З м і н а 1	Д Н Ц 1	Ситуація 1	3	1	Так	4	2	Так
		Ситуація 2	3	2	Так	5	2	Так
		Ситуація 3	3	3	Ні	6	3	Так
		Ситуація 4	4	1	Так	9	3	Так
		Ситуація 5	4	3	Ні	12	4	Так
		Ситуація 6	5	1	Так	16	4	Ні
		Ситуація 7	5	3	Так	15	4	Так
		Ситуація 8	5	4	Ні	16	5	Ні
		Ситуація 9	6	3	Ні	20	5	Так
		Ситуація 10	6	4	Ні	18	6	Так
	Д Н Ц 2	Ситуація 1	3	1	Так	5	2	Так
		Ситуація 2	3	2	Так	6	2	Так
		Ситуація 3	3	3	Ні	7	3	Так
		Ситуація 4	4	1	Так	7	3	Так
		Ситуація 5	4	3	Ні	15	4	Так
		Ситуація 6	5	1	Так	17	4	Так
		Ситуація 7	5	3	Так	19	4	Ні
		Ситуація 8	5	4	Ні	19	5	Ні
		Ситуація 9	6	3	Ні	21	5	Так
		Ситуація 10	6	4	Ні	24	6	Так
	Д Н Ц 3	Ситуація 1	3	1	Так	5	2	Так
		Ситуація 2	3	2	Так	5	2	Так
		Ситуація 3	3	3	Ні	7	3	Ні
		Ситуація 4	4	1	Так	11	3	Так
		Ситуація 5	4	3	Ні	7	4	Так
		Ситуація 6	5	1	Так	9	4	Так
		Ситуація 7	5	3	Так	13	4	Так
		Ситуація 8	5	4	Ні	15	5	Так

Додаток П
(продовження)

3 м і н а 2		Ситуація 9	6	3	Ні	20	5	Ні
		Ситуація 10	6	4	Ні	20	6	Ні
	Д Н Ц 4	Ситуація 1	3	1	Так	4	2	Так
		Ситуація 2	3	2	Так	6	2	Так
		Ситуація 3	3	3	Ні	9	3	Так
		Ситуація 4	4	1	Так	8	3	Так
		Ситуація 5	4	3	Ні	8	4	Так
		Ситуація 6	5	1	Так	12	4	Так
		Ситуація 7	5	3	Так	16	4	Ні
		Ситуація 8	5	4	Ні	16	5	Так
		Ситуація 9	6	3	Ні	20	5	Так
		Ситуація 10	6	4	Ні	22	6	Ні
	Д Н Ц 5	Ситуація 1	3	1	Так	6	2	Так
		Ситуація 2	3	2	Так	7	2	Так
		Ситуація 3	3	3	Ні	8	3	Так
		Ситуація 4	4	1	Так	10	3	Ні
		Ситуація 5	4	3	Ні	8	4	Ні
		Ситуація 6	5	1	Так	16	4	Так
		Ситуація 7	5	3	Так	19	4	Так
		Ситуація 8	5	4	Ні	20	5	Так
		Ситуація 9	6	3	Ні	18	5	Ні
		Ситуація 10	6	4	Ні	19	6	Так
	Д Н Ц 6	Ситуація 1	3	1	Так	7	2	Так
		Ситуація 2	3	2	Так	6	2	Ні
		Ситуація 3	3	3	Ні	10	3	Так
		Ситуація 4	4	1	Так	13	3	Так
		Ситуація 5	4	3	Ні	15	4	Так
		Ситуація 6	5	1	Так	17	4	Ні
		Ситуація 7	5	3	Так	20	4	Так
		Ситуація 8	5	4	Ні	18	5	Так
		Ситуація 9	6	3	Ні	20	5	Ні
		Ситуація 10	6	4	Ні	20	6	Так
		Ситуація 1	3	1	Так	7	2	Так
		Ситуація 2	3	2	Так	5	2	Так
		Ситуація 3	3	3	Ні	8	3	Так
		Ситуація 4	4	1	Так	7	3	Ні

Додаток П
(продовження)

З м і н а 2 9 0		Ситуація 5	4	3	Ні	8	4	Так
		Ситуація 6	5	1	Так	17	4	Так
		Ситуація 7	5	3	Так	14	4	Так
		Ситуація 8	5	4	Ні	15	5	Ні
		Ситуація 9	6	3	Ні	15	5	Так
		Ситуація 10	6	4	Ні	18	6	Ні
	Д Н Ц 8	Ситуація 1	3	1	Так	5	2	Так
		Ситуація 2	3	2	Так	5	2	Так
		Ситуація 3	3	3	Ні	10	3	Так
		Ситуація 4	4	1	Так	8	3	Так
		Ситуація 5	4	3	Ні	7	4	Так
		Ситуація 6	5	1	Так	14	4	Ні
		Ситуація 7	5	3	Так	15	4	Так
		Ситуація 8	5	4	Ні	16	5	Так
		Ситуація 9	6	3	Ні	19	5	Ні
		Ситуація 10	6	4	Ні	23	6	Так
	Д Н Ц 9	Ситуація 1	3	1	Так	4	2	Так
		Ситуація 2	3	2	Так	4	2	Так
		Ситуація 3	3	3	Ні	10	3	Ні
		Ситуація 4	4	1	Так	12	3	Так
		Ситуація 5	4	3	Ні	15	4	Ні
		Ситуація 6	5	1	Так	14	4	Так
		Ситуація 7	5	3	Так	12	4	Так
		Ситуація 8	5	4	Ні	18	5	Ні
		Ситуація 9	6	3	Ні	22	5	Так
		Ситуація 10	6	4	Ні	25	6	Так
	Д Н Ц 1 0	Ситуація 1	3	1	Так	6	2	Так
		Ситуація 2	3	2	Так	5	2	Так
		Ситуація 3	3	3	Ні	7	3	Так
		Ситуація 4	4	1	Так	8	3	Так
		Ситуація 5	4	3	Ні	9	4	Так
		Ситуація 6	5	1	Так	12	4	Так
		Ситуація 7	5	3	Так	20	4	Ні
		Ситуація 8	5	4	Ні	20	5	Так
		Ситуація 9	6	3	Ні	19	5	Так
		Ситуація 10	6	4	Ні	22	6	Ні

Додаток П
(продовження)

З м і н а 3	Д Н Ц 1 1	Ситуація 1	3	1	Так	5	2	Так
		Ситуація 2	3	2	Так	7	2	Так
		Ситуація 3	3	3	Ні	7	3	Так
		Ситуація 4	4	1	Так	9	3	Так
		Ситуація 5	4	3	Ні	9	4	Ні
		Ситуація 6	5	1	Так	12	4	Так
		Ситуація 7	5	3	Так	15	4	Так
		Ситуація 8	5	4	Ні	18	5	Так
		Ситуація 9	6	3	Ні	21	5	Ні
		Ситуація 10	6	4	Ні	24	6	Так
	Д Н Ц 1 2	Ситуація 1	3	1	Так	4	2	Так
		Ситуація 2	3	2	Так	6	2	Так
		Ситуація 3	3	3	Ні	8	3	Так
		Ситуація 4	4	1	Так	11	3	Так
		Ситуація 5	4	3	Ні	11	4	Так
		Ситуація 6	5	1	Так	13	4	Так
		Ситуація 7	5	3	Так	19	4	Так
		Ситуація 8	5	4	Ні	21	5	Ні
		Ситуація 9	6	3	Ні	20	5	Так
		Ситуація 10	6	4	Ні	19	6	Ні
	Д Н Ц 1 3	Ситуація 1	3	1	Так	4	2	Так
		Ситуація 2	3	2	Так	5	2	Так
		Ситуація 3	3	3	Ні	8	3	Так
		Ситуація 4	4	1	Так	10	3	Так
		Ситуація 5	4	3	Ні	13	4	Так
		Ситуація 6	5	1	Так	11	4	Так
		Ситуація 7	5	3	Так	14	4	Ні
		Ситуація 8	5	4	Ні	16	5	Так
		Ситуація 9	6	3	Ні	18	5	Так
		Ситуація 10	6	4	Ні	19	6	Ні
		Ситуація 1	3	1	Так	6	2	Так
		Ситуація 2	3	2	Так	5	2	Так
		Ситуація 3	3	3	Ні	6	3	Так
		Ситуація 4	4	1	Так	11	3	Так
		Ситуація 5	4	3	Ні	12	4	Так

Додаток П
(продовження)

З м і н а 4	Д Н Ц 1 5	Ситуація 6	5	1	Так	14	4	Ні
		Ситуація 7	5	3	Так	15	4	Так
		Ситуація 8	5	4	Ні	17	5	Так
		Ситуація 9	6	3	Ні	18	5	Ні
		Ситуація 10	6	4	Ні	18	6	Так
		Ситуація 1	3	1	Так	4	2	Так
		Ситуація 2	3	2	Так	4	2	Так
		Ситуація 3	3	3	Ні	9	3	Так
		Ситуація 4	4	1	Так	11	3	Так
		Ситуація 5	4	3	Ні	14	4	Так
	Д Н Ц 1 6	Ситуація 6	5	1	Так	12	4	Так
		Ситуація 7	5	3	Так	14	4	Ні
		Ситуація 8	5	4	Ні	16	5	Так
		Ситуація 9	6	3	Ні	19	5	Так
		Ситуація 10	6	4	Ні	20	6	Ні
		Ситуація 1	3	1	Так	5	2	Так
		Ситуація 2	3	2	Так	6	2	Так
		Ситуація 3	3	3	Ні	7	3	Так
		Ситуація 4	4	1	Так	7	3	Ні
		Ситуація 5	4	3	Ні	15	4	Так
	Д Н Ц 1 7	Ситуація 6	5	1	Так	16	4	Так
		Ситуація 7	5	3	Так	20	4	Так
		Ситуація 8	5	4	Ні	19	5	Ні
		Ситуація 9	6	3	Ні	22	5	Так
		Ситуація 10	6	4	Ні	21	6	Так
		Ситуація 1	3	1	Так	4	2	Так
		Ситуація 2	3	2	Так	5	2	Так
		Ситуація 3	3	3	Ні	9	3	Так
		Ситуація 4	4	1	Так	12	3	Так
		Ситуація 5	4	3	Ні	12	4	Ні
	Д Н Ц 1 7	Ситуація 6	5	1	Так	12	4	Так
		Ситуація 7	5	3	Так	15	4	Так
		Ситуація 8	5	4	Ні	17	5	Так
		Ситуація 9	6	3	Ні	20	5	Ні
		Ситуація 10	6	4	Ні	22	6	Так
		Ситуація 1	3	1	Так	7	2	Так

Додаток П
(продовження)

	Д Н Ц 1 8	Ситуація 2	3	2	Так	5	2	Так
		Ситуація 3	3	3	Ні	6	3	Так
		Ситуація 4	4	1	Так	8	3	Так
		Ситуація 5	4	3	Ні	12	4	Так
		Ситуація 6	5	1	Так	13	4	Ні
		Ситуація 7	5	3	Так	16	4	Так
		Ситуація 8	5	4	Ні	19	5	Так
		Ситуація 9	6	3	Ні	20	5	Так
		Ситуація 10	6	4	Ні	23	6	Ні
	Д Н Ц 1 9	Ситуація 1	3	1	Так	4	2	Так
		Ситуація 2	3	2	Так	6	2	Так
		Ситуація 3	3	3	Ні	10	3	Так
		Ситуація 4	4	1	Так	13	3	Так
		Ситуація 5	4	3	Ні	15	4	Так
		Ситуація 6	5	1	Так	18	4	Так
		Ситуація 7	5	3	Так	16	4	Так
		Ситуація 8	5	4	Ні	18	5	Ні
		Ситуація 9	6	3	Ні	19	5	Так
		Ситуація 10	6	4	Ні	22	6	Ні
	Д Н Ц 2 0	Ситуація 1	3	1	Так	5	2	Так
		Ситуація 2	3	2	Так	4	2	Так
		Ситуація 3	3	3	Ні	8	3	Так
		Ситуація 4	4	1	Так	7	3	Так
		Ситуація 5	4	3	Ні	12	4	Так
		Ситуація 6	5	1	Так	13	4	Так
		Ситуація 7	5	3	Так	14	4	Ні
		Ситуація 8	5	4	Ні	17	5	Так
		Ситуація 9	6	3	Ні	20	5	Ні
		Ситуація 10	6	4	Ні	24	6	Так

Додаток Р

Оцінка величини додаткових витрат на п'ять років, до та після застосування запропонованої технології

Показник	Рік розрахункового періоду				
	2025	2026	2027	2028	2029
Оцінка величини додаикових витрат до застосування запропонованої технології					
1. Загальні експлуатаційні витрати, грн.	127530,02	127530,02	127530,02	127530,02	127530,02
2. Експлуатаційні витрати при графіковому прямованні, грн	46984,06	46984,06	46984,06	46984,06	46984,06
3. Величина додаткових витрат, грн.	80545,96	80545,96	80545,96	80545,96	80545,96
4. Коефіцієнт приведення витрат різних років до розрахункового року.	1	0,8	0,66	0,52	0,42
5. Величини додаткових витрат з урахуванням приведення до розрахункового року, грн	80545,96	64436,77	53160,33	41883,9	33829,3
6. Величина додаткових витрат за наростаючим підсумком, грн	80545,96	144982,73	198143,06	240026,96	273856,26
Оцінка величини додаткових витрат після застосування запропонованої технології з використанням «поїзда-шаттлу» та автомобільного транспорту					
	2024	2025	2026	2027	2028
1. Загальні експлуатаційні витрати, грн.	90046,18	90046,18	90046,18	90046,18	90046,18
2. Експлуатаційні витрати при графіковому прямованні, грн	46984,06	46984,06	46984,06	46984,06	46984,06

3. Величина додаткових витрат, грн.	43062,12	43062,12	43062,12	43062,12	43062,12
4. Коефіцієнт приведення витрат різних років до розрахункового року.	1	0,8	0,66	0,52	0,42
5. Величина додаткових витрат з урахуванням приведення до розрахункового року, грн	43062,12	34449,70	28421,00	22392,30	18086,09
6. Величина додаткових витрат за нарастаючим підсумком, грн	43062,12	77511,82	105932,82	128325,12	146411,21
Оцінка величини додаткових витрат після застосування запропонованої технології з використанням лише «поїзда-шаттлу»					
1. Загальні експлуатаційні витрати, грн.	107102,72	107102,72	107102,72	107102,72	107102,72
2. Експлуатаційні витрати при графіковому прямованні, грн	46984,06	46984,06	46984,06	46984,06	46984,06
3. Величина додаткових витрат, грн.	60118,66	60118,66	60118,66	60118,66	60118,66
4. Коефіцієнт приведення витрат різних років до розрахункового року.	1	0,8	0,66	0,52	0,42
5. Величина додаткових витрат з урахуванням приведення до розрахункового року, грн	60118,66	48094,93	39678,32	31261,70	25149,84
6. Величина додаткових витрат за нарастаючим підсумком, грн	60118,66	108213,59	147891,91	179153,61	204303,45

Додаток С

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

Публікації у фахових виданнях України:

1. Бутько Т. В., Примаченко Г. О., Тарасов К. О. Удосконалення існуючих методів організації пасажирських залізничних перевезень з урахуванням можливих ризиків руйнування залізничної інфраструктури. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2022. Т. 27, № 3. С. 3–9.
URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v27i3.265527>

2. Примаченко Г.О., Шкурченко О.В., Будник В.А., Корнійко Я.Р., Тарасов К.О. Удосконалення технології мультимодальних пасажирських перевезень в умовах воєнного стану в Україні. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*, 2023. № 100. С. 120.
URL: <https://doi.org/10.30977/bul.2219-5548.2023.100.0.120>

3. Бутько Т.В., Пархоменко Л. О., Тарасов К.О., Гайдук Д.А. Формалізація процедури надання альтернативного маршруту швидкісним пасажирським поїздам на основі ризик-менеджменту. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. Т. 28, № 1. С. 31–37.
URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i1.276341>

4. Тарасов К.О. Удосконалення чинної системи оперативного управління швидкісними залізничними пасажирськими перевезеннями *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. Т. 29, № 3. С. 33–40.
URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i3.313607>

Публікації, що включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та WoS:

5. Butko T., Prymachenko H., Kovalov A., Tarasov K., Kolisnyk A. Research on the Issue of Prognosticationing the Volume of Passenger Traffic on Railway Transport in

Meanm Conditions. *Review of Economics and Finance*. 2023. Vol. 21. P. 236–245. URL: <https://doi.org/10.55365/1923.x2023.21.22> (Scopus)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Butko T., Primachenko H., Tarasov K. Formation of alternative routes for passenger trains in the event of non-standard situations. *MATEC Web of Conferences*. 2024. Vol. 390. P. 03003. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/202439003003> (Web of Science)

7. Примаченко Г.О., Тарасов К.О., Григорова Є.І. Удосконалення логістичного управління при перевезенні пасажирів. *Інформаційно - керуючі системи на залізничному транспорті: тези стендових доповідей та виступів учасників 34-ї міжнародної науково-практичної конференції*. Харків: УкрДУЗТ, 2021. - №3 (Додаток). – С. 15. URL: https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2021/10/34-mnpk_2021.pdf

8. Примаченко Г.О., Тарасов К.О. Дослідження технології визначення прогнозної оцінки пасажирообігу на залізничному транспорті. *Нові інформаційні технології управління бізнесом: тези V Всеукраїнської науково-практичної конференції*. (Київ, 16 лютого 2022 р.). – Київ: Спілка автоматизаторів бізнесу, 2022. С. 238-241. URL: <http://www.unionba.com.ua/seminars/v-vseukrayinska-naukovo-prakticna-konferenciya>

9. Примаченко Г.О., Тарасов К.О., Григорова Є.І. Підвищення надійності транспортних систем на основі удосконалення організаційно-технологічної структури проектів мультимодальних перевезень. *Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем: матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції* (Кропивницький, 13-15 квітня 2022 р). Кропивницький : ЦНТУ, 2022. С. 108-110. URL: <http://erm.kntu.kr.ua/KONFERENSIJA.html>

10. Prymachenko H.O., Tarasov K.O. Organization of rail transportation in martial law conditions. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та*

корпоративна логістика: матеріали вісімнадцятої науково - практичної міжнародної конференції (Харків, 2 – 3 червня 2022 р.) Харків: УкрДУЗТ, 2022. С 178-180.

11. Примаченко Г.О., Тарасов К.О., Григорова Є.І., Карпенко Н.А. Сучасний стан логістики вантажних перевезень в Україні. *Інтелектуальні транспортні технології*: тези 3-ї міжнародної науково-технічної конференції (Харків, 22 – 23 листопада 2022 р.) Харків: УкрДУЗТ, 2022. С 145-147.

12. Примаченко Г.О., Тарасов К.О., Григорова Є.І. Удосконалення процесу міжнародних залізничних перевезень в Україні. *Інформаційно- керуючі системи на залізничному транспорті*: тези стендових доповідей та виступів учасників 35-ї міжнародної науково-практичної конференції. (Харків, 11 листопада 2022 р.) Харків: УкрДУЗТ, 2022. №3 (Додаток). С. 19-20. URL: <https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2022/11/tezi-3dodatok-2022.pdf>

13. Примаченко Г.О., Тарасов К.О. Удосконалення процесу організації пасажирських залізничних перевезень при виникненні нестандартних ситуацій. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика*: тези дев'ятнадцятої науково - практичної міжнародної конференції (Харків, 1-2 червня 2023 р.) Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 168-170.

14. Butko T., Primachenko H., Tarasov K. Formation of alternative routes for passenger trains in the event of non-standard situations. *Energy-optimal technologies, logistics and safety on transport*: materials of the 3-nd International Scientific and Practical Conference (Lviv, 9–10 November 2023) Lviv Polytechnic Publishing House. 2023 P. 58-59

15. Примаченко Г.О., Тарасов К.О., Родін Р.Д. Удосконалення організації руху регіональних поїздів за допомогою адаптивного метаверстичного підходу *Інтелектуальні транспортні технології*: тези 4-ї міжнародної науково-технічної конференції (Харків, 27 – 28 листопада 2023 р.) Харків: УкрДУЗТ, 2023. С 204-205. URL: <https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2023/11/zbirnik-tez-dopovidej-itt2023-1.pdf> (

16. Примаченко Г.О., Тарасов К.О. Організація пасажиропотоків за умови еластичного попиту. *Прикладні науково-технічні дослідження: матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції*. (Івано-Франківськ, 14-16 травня 2024 р.) Академія технічних наук України. – Івано-Франківськ : Видавець Кушнір Г. М. – 2024. – С. 211-212. URL: <https://ukrtsa.org.ua/wp-content/uploads/2024/05/conf2024.pdf>

17. Примаченко Г.О., Тарасов К.О. Формування альтернативних маршрутів для пасажирських поїздів на основі генетичних алгоритмів. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика: тези двадцяті науково - практичної міжнародної конференції*. (Харків, 6-7 червня 2023 р.) Харків: УкрДУЗТ, 2024. С. 164-165.

Додаткові праці, які відображають результати дисертації:

18. Тарасов К. О. Формування альтернативних маршрутів пасажирських поїздів за допомогою апарату генетичних алгоритмів. *Транспортні технології в сучасних умовах* : колективна монографія / за заг. ред. Г. О. Примаченко. – Академія технічних наук України. – Івано-Франківськ: Видавець Кушнір Г. М. – 2024. - 212 с. – С. 111–143.

Відомості про апробацію результатів дисертації:

1. Тридцять четвертій міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційно - керуючі системи на залізничному транспорті» (Харків 2021р.); (заочна участь)

2. V Всеукраїнській науково-практичній конференції «Нові інформаційні технології управління бізнесом» (Київ, 16 лютого 2022 р.); (заочна участь)

3. IV Міжнародній науково-практичній конференції «Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем» (Кропивницький, 13-15 квітня 2022 р.); (заочна участь)

4. Вісімнадцятій науково - практичній міжнародній конференції «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика»(Харків, 2 – 3 червня 2022 р.); (заочна очасьть)
5. 3-й міжнародній науково-технічній конференції «Інтелектуальні транспортні технології» (Харків, 22 – 23 листопада 2022 р.) (заочна участь)
6. Тридцять п'ятій міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційно - керуючі системи на залізничному транспорті» (Харків, 11 листопада 2022 р.); (заочна участь)
7. Дев'ятнадцятій науково - практичній міжнародній конференції «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика» (Харків, 1-2 червня 2023 р.); (заочна участь)
8. 3-nd International Scientific and Practical Conference «Energy-optimal technologies, logistics and safety on transport: materials of the» (Lviv, 9–10 November 2023); (особиста участь)
9. Четвертій міжнародній науково-технічній конференції «Інтелектуальні транспортні технології» (Харків, 27 – 28 листопада 2023 р.); (заочна участь)
10. VI міжнародній науково-практичній конференції «Прикладні науково-технічні дослідження» (Івано-Франківськ, 14-16 травня 2024 р.) (особиста участь)
11. Двадцятій науково - практичній міжнародній конференції «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика» (Харків, 6-7 червня 2023 р.) (заочна участь)

Додаток Т

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник структурного підрозділу
«Служба локомотивного господарства»
Регіональної філії «Південна залізниця»
Дмитро КРИКУН



АКТ

Про впровадження розробки, що виконано аспірантом, Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ) Тарасовим Кирилом Олександровичем під керівництвом к.т.н., доцента Примаченко Г.О., технології надання альтернативних маршрутів для різних категорій поїздів.

У період з січня 2024 р. по серпень 2024 р. апробовано результати дисертаційного дослідження, виконаного Тарасовим К.О. в межах полігонів підпорядкованих «Службі локомотивного господарства» регіональної філії «Південна залізниця».

Встановлене наступне:

1. На підставі попереднього аналізу показників експлуатаційної роботи, рекомендовано до впровадження багатокритеріальну модель короткострокового прогнозування на основі нейронних мереж. Результати прогнозування мають похибку не більше 5% від реальних значень показників експлуатаційної роботи.
2. Тестування технології надання альтернативних маршрутів, в межах полігону підпорядкованому «Службі локомотивного господарства» регіональної філії «Південна залізниця», для різних категорій поїздів показало, що при виникненні надзвичайної ситуації при якій повністю припиняється рух поїздів на певній ділянці, можливо скоротити рівень додаткових організаційних та експлуатаційних витрат на використання локомотивної тяги на 5-7%.
3. Розробку виконано відповідно до пріоритетних напрямків розвитку та в умовах реструктурування галузі, з урахуванням складних умов запровадження воєнного стану в країні, тому, її основні складові рекомендовано до подальшого впровадження.

ТЗ

Богдан ЗАСЦЬ

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з науково-педагогічної роботи
Українського державного університету
залізничного транспорту



К.Т.Н., доцент

Артур КАГРАМАНЯН

«14 жовтня» 2024 р.

АКТ**про впровадження**

**результатів дисертаційної роботи Тарасова Кирила Олександровича
у навчальному процесі факультету «Управління процесами перевезень»
Українського державного університету залізничного транспорту**

До основних результатів дисертаційної роботи Тарасова К.О., що використовуються у навчальному процесі факультету «Управління процесами перевезень» Українського державного університету залізничного транспорту, належать:

- детальний аналіз статистичних даних, щодо обсягів пасажирських залізничних перевезень в Україні за останні роки, який дозволяє оцінити існуючий стан транспортної галузі, зокрема після впливу таких макрофакторів, як запровадження військового стану та карантинних обмежень внаслідок епідемії вірусу Covid-19

- багатокритеріальна модель прогнозування пасажиропотоків, яка створена на основі апарату нейронних мереж та враховує такі фактори, як: кількість перевезених пасажирів, сезонність перевезень, ефект «вихідного дня», кількість населення та рівень заробітної плати в регіонах через який проходить маршрут заданого пасажирського поїзду, величину дохідної ставки від цих перевезень та вплив фактору безпеки.

- технологія та автоматизована система надання альтернативних маршрутів, для швидкісних пасажирських поїздів, яка застосовується в разі виникнення

нестандартної ситуації, в результаті якої необхідне закриття певної залізничної дільниці. Розроблена модель враховує такі фактори, як наявність електрифікації, величина пропускної спроможності та час прямування по кожній заданій дільниці, можливість використання додаткових «поїздів-шаттлів» та автомобільного транспорту для підвозу пасажирів. Формування моделі надання альтернативних маршрутів було проведено на основі апарату генетичних алгоритмів. Основною перевагою якої є можливість адаптації до різних умов і обмежень, що дозволяє швидко реагувати на непередбачені обставини та забезпечувати безперервність пасажирських перевезень.

Дані розробки з 2022 року використовуються:

- 1) При проведенні занять у групах факультету «Управління процесами перевезень»;
- 2) При підготовці бакалаврів та магістрів зі спеціальності «Організація перевезень та управління на транспорті» з дисциплін:
 - управління ланцюгом постачання;
 - логістика;
 - взаємодія видів транспорту.
- 3) При виконанні випускних кваліфікаційних робіт бакалаврів та магістрів.

Декан факультету

«Управління процесами перевезень»

к.т.н., доцент



Максим КУЦЕНКО